



Bayerische
Forschungsförderung

ABSCHLUSSBERICHT

FORobotics – mobile ad-hoc kooperierende Roboterteams

Aktenzeichen:

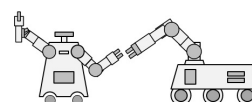
AZ-1225-16

Förderzeitraum:

01. Januar 2017 bis 30. Juni 2020

Berichtszeitraum:

01. Januar 2017 bis 30. Juni 2020



FORobotics

Diese Publikation ist dauerhaft nachgewiesen im Repository der Fraunhofer-Gesellschaft unter <https://doi.org/10.24406/igcv-n-624794>.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

BETEILIGTE INDUSTRIEPARTNER

Bertrandt Ingenieurbüro GmbH

Cioplenu GmbH

Framatome GmbH
(vormals AREVA GmbH)

Grenzebach Maschinenbau GmbH

ITQ GmbH

Industrie- und Handelskammer Schwaben

Krones AG

MAN Truck & Bus AG

Mangelberger Elektrotechnik GmbH

Mayser Sicherheitstechnik GmbH

Metrilus GmbH

Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG
(vormals Hefter Maschinenbau GmbH & Co. KG)

MRK-Systeme GmbH

PTM Mechatronics GmbH

Roboception GmbH

SALT Solutions AG

Siemens Gerätewerk Erlangen (GWE)

Software 4 Production GmbH

Software Factory GmbH

Stäubli Tec-Systems GmbH

Teamware GmbH

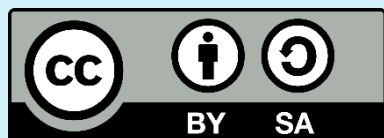
Yaskawa Europe GmbH, Division Robotics

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Am Technologiezentrum 10
86159 Augsburg

Universität Bayreuth
Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme)
Prof. Dr. Dominik Henrich
Universitätsstraße 30
95447 Bayreuth

Titelbild: © Pugin & Photo Studio - stock.adobe.com
Sonstige Bilder und Illustrationen (falls nicht anders angegeben): © Fraunhofer IGCV

Der Text dieser Broschüre wird freigegeben unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen, Version 3.0 Deutschland (CC BY-SA 3.0 de).



Unter der Bedingung, dass die Publikation als »Reinhart, Gunther und Henrich, Do-

minik (2021). Abschlussbericht FORobotics – mobile ad-hoc kooperierende Roboterteams« sowie die Lizenz als »Lizenz: CC BY-SA 3.0 de« einschließlich der untenstehenden Lizenz-URL genannt werden, darf der Text dieser Broschüre vervielfältigt, weitergereicht und auf beliebige Weise genutzt werden, auch kommerziell und ebenso online wie in gedruckter oder anderer Form. Auch die Bearbeitung ist erlaubt unter der zusätzlichen Bedingung, dass das neu entstandene Werk als Bearbeitung gekennzeichnet wird und im Falle einer Veröffentlichung

unter derselben Lizenz wie diese Broschüre freigegeben wird.

Die vollständigen Lizenzbedingungen sind zu finden unter der URL <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/legalcode>

Eine vereinfachte Darstellung der durch die Lizenz gegebenen Freiheiten ist zu finden unter <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>

VORWORT

Eine steigende Variantenvielfalt und kürzere Produktlebenszyklen führen zu einem erhöhten Bedarf flexibler und wandlungsfähiger Produktionssysteme. Dazu zählen auch mobile Robotersysteme, die prinzipiell für einen flexiblen Einsatz konzipiert sind. Ein weitreichender Einsatz dieser Systeme, insbesondere wenn der Bedarf nach Flexibilität besteht, ist noch nicht zu verzeichnen. Häufig sind diese einzelnen Systeme in ihren Fähigkeiten durch ein bestimmtes Werkzeug oder einen Greifer beschränkt oder die Fähigkeit zur Erkennung von Objekten bzw. Menschen ist nicht genügend ausgebaut. Daher verfolgte dieses Forschungsverbundprojekt „FORobotics – mobile, ad-hoc kooperierende Roboterteams“ das Ziel, die Fähigkeiten mobiler Roboter zu erweitern und die Bildung von Teams, bestehend aus mehreren verschiedenen Robotersystemen oder aus Robotersystem und Mensch, auszunutzen, um den Einschränkungen zu begegnen. Dazu sollten die Fähigkeiten verschiedener Ressourcen vereint werden, um eine Produktivitätssteigerung zu erzielen.

Das Forschungsvorhaben startete mit 7 Forschungsinstituten und 18 Industriepartnern, die im Laufe des Projekts auf 21 erhöht wurden. Dies zeigt auch das große Interesse an der Themenstellung. Während des Projekts bauten die Partner einen mobilen Roboter auf, der im Projekt genutzt wurde. Zum Ende des Projekts gab es drei dieser mobilen Robotersysteme, sodass eine Teamarbeit ermöglicht wurde. Im ersten Projektjahr wurden bei

drei Firmen Anwendungsfälle analysiert, die zu einem zentralen Use Case zusammengeführt wurden, anhand dessen die Ergebnisse des Projekts bearbeitet wurden. Die Fertigstellung der Plattform verzögerte sich bis Mitte des zweiten Projektjahres, was insgesamt zu einer Verzögerung des Projektablaufs führte. Zur zweiten Zwischenbegutachtung konnte die erste Umsetzung des Demonstrators präsentiert werden.

Ab dem dritten Projektjahr wurde der mobile Roboter auch bei den anwendenden Firmen eingesetzt, um das Robotersystem in einem realen industriellen Umfeld zu untersuchen. Dabei konnten Erkenntnisse erlangt werden, welche weiteren Arbeiten notwendig sind, um diese Robotersysteme industriell einsetzen zu können. Die zweite Ausbaustufe des Demonstrators, bei dem die Roboter untereinander kooperieren, soll an der Abschlussbegutachtung präsentiert werden.

Meinen besonderen Dank möchte ich der Bayerischen Forschungstiftung aussprechen, die diesen Verbund gefördert hat. Mit den Arbeiten in diesem Projekt konnten wertvolle Erkenntnisse zum Einsatz mobiler Roboter(teams) gewonnen werden und Forschungsfragen für nachfolgende Projekte abgeleitet werden. Außerdem danke ich den zahlreichen Industriepartnern, durch die dem Forschungsvorhaben eine besondere Bedeutung beigemessen und eine anwendungsorientierte Arbeit ermöglicht wurde.

Augsburg, im April 2020

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhardt

Sprecher des Forschungsverbundes FORobotics

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | PROJEKTÜBERBLICK..... | 3 |
| 1.1 | Kurzbeschreibung des Projekts | 3 |
| 1.2 | Laufzeit, Fördersumme und Förderquote | 4 |
| 2 | ANGABEN ZUM PROJEKT..... | 5 |
| 2.1 | Ausgangssituation und Motivation | 5 |
| 2.2 | Zielsetzung des Forschungsverbunds..... | 6 |
| 2.3 | Struktur des Forschungsverbunds | 7 |
| 3 | SITUATIONSBERICHT..... | 10 |
| 3.1 | Zusammenfassung der Arbeiten im Projekt | 10 |
| 4 | ERGEBNISSE DER TEILPROJEKTE | 13 |
| 4.1 | Teilprojekt 1 – Dienstbasierte Betriebsmittel | 13 |
| 4.1.1 | Allgemeine Angaben | 13 |
| 4.1.2 | Ausgangssituation und Zielsetzung..... | 13 |
| 4.1.3 | Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss..... | 14 |
| 4.1.4 | Kooperation mit anderen Teilprojekten..... | 32 |
| 4.1.5 | Veröffentlichungen | 33 |
| 4.1.6 | Literaturverzeichnis | 33 |
| 4.2 | Teilprojekt 2 - Umfelderkennung, Absicherung und lokale Bahnplanung..... | 36 |
| 4.2.1 | Allgemeine Angaben | 36 |
| 4.2.2 | Ausgangssituation und Zielsetzung..... | 36 |
| 4.2.3 | Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss..... | 37 |
| 4.2.4 | Kooperation mit anderen Teilprojekten..... | 64 |
| 4.2.5 | Veröffentlichungen | 65 |
| 4.2.6 | Literaturverzeichnis | 65 |
| 4.3 | Teilprojekt 3 - Aufgabenorientierte Planung..... | 70 |
| 4.3.1 | Allgemeine Angaben | 70 |
| 4.3.2 | Ausgangssituation und Zielsetzung..... | 70 |
| 4.3.3 | Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss..... | 71 |
| 4.3.4 | Kooperation mit anderen Teilprojekten..... | 91 |
| 4.3.5 | Veröffentlichungen | 92 |
| 4.3.6 | Literaturverzeichnis | 92 |
| 4.4 | Teilprojekt 4 – Interaktion | 94 |
| 4.4.1 | Allgemeine Angaben | 94 |
| 4.4.2 | Ausgangssituation und Zielsetzung..... | 94 |
| 4.4.3 | Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss..... | 96 |
| 4.4.4 | Kooperation mit anderen Teilprojekten..... | 126 |
| 4.4.5 | Veröffentlichungen | 127 |
| 4.4.6 | Literaturverzeichnis | 128 |
| 4.5 | Teilprojekt 5 - Empirische Nutzerevaluation..... | 129 |
| 4.5.1 | Allgemeine Angaben | 129 |
| 4.5.2 | Ausgangssituation und Zielsetzung..... | 129 |
| 4.5.3 | Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss..... | 129 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.5.4 | Kooperationen mit anderen Teilprojekten | 150 |
| 4.5.5 | Veröffentlichungen | 150 |
| 4.5.6 | Literaturverzeichnis | 151 |
| 4.6 | Teilprojekt D – Demonstrator | 154 |
| 4.6.1 | Allgemeine Angaben | 154 |
| 4.6.2 | Ausgangssituation und Zielsetzung | 154 |
| 4.6.3 | Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss | 154 |
| 4.6.4 | Kooperationen mit anderen Teilprojekten | 180 |
| 4.6.5 | Veröffentlichungen | 181 |
| 5 | BERICHT ÜBER ZUSAMMENARBEIT IM VERBUND | 182 |
| 5.1 | Struktur der Zusammenarbeit | 182 |
| 5.1.1 | Zusammenarbeit im Verbund | 182 |
| 5.1.2 | Einbindung Studierender | 182 |
| 5.2 | Thematische Kolloquien | 183 |
| 5.2.1 | Themen der ersten beiden Jahre | 184 |
| 5.2.2 | Plattformintegration | 184 |
| 5.2.3 | Arbeitskreis der Anwender | 184 |
| 5.2.4 | Evaluation bei den Anwendern | 185 |
| 6 | BERICHT DER KOORDINIERUNGSSTELLE | 186 |
| 6.1 | Koordinierungsarbeiten im Verbund | 186 |
| 6.2 | Öffentlichkeitsarbeit des Verbunds | 186 |
| 6.2.1 | Homepage | 186 |
| 6.2.2 | Veröffentlichungen | 187 |
| 6.2.3 | Messen | 188 |
| 6.2.3.1 | Kongress des bayerischen Zukunftsrats (TechCheck München) | 188 |
| 6.2.3.2 | TechCheck Augsburg | 188 |
| 6.2.3.3 | Testbed im Technologiezentrum Augsburg | 188 |
| 6.2.3.4 | Weitere Messeauftritte | 188 |
| 6.2.4 | Vorträge auf Veranstaltungen | 188 |
| 6.2.4.1 | Tea-Kongress Augsburg | 189 |
| 6.2.4.2 | Vortrag bei Marcus Evans | 189 |
| 6.2.5 | Tagung mobile Robotik | 189 |
| 7 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK | 191 |
| 7.1 | Bewertung der Arbeiten zu Projektende | 191 |
| 7.2 | Ausblick | 193 |

1 PROJEKTÜBERBLICK

Julia Berger

1.1 Kurzbeschreibung des Projekts

Eine zunehmende Variantenvielfalt durch kundenindividuelle Produkte führt zu besonderen Anforderungen an die Logistik und die Montage in Produktionsumgebungen. Komponenten und Werkzeuge müssen flexibel und auftragsspezifisch an der entsprechenden Station bereitgestellt und genutzt werden. Diesem Sachverhalt stehen hohe und weiter steigende Löhne in Hochlohnländern wie Deutschland gegenüber, die einen gewissen Grad an Automatisierung erfordern, um den Produktionsstandort Deutschland zu erhalten.

Mobile Robotersysteme bieten grundsätzlich die Möglichkeit, manuelle Vorgänge, insbesondere in der Logistik, zu automatisieren. Allerdings sind einzelne mobile Robotersysteme in ihren Fähigkeiten durch eine bestimmte Traglast oder den eingesetzten Greifer beschränkt. Um dieser Beschränkung entgegenzuwirken, werden in dem Forschungsverbundprojekt FORobotics mobile Roboterteams adressiert. Diese sollen sich gegenseitig mit ihren Fähigkeiten ergänzen und zusammenarbeiten, sodass die Gesamtleistung des Teams steigt. Ein Team kann hierbei aus mehreren Robotersystemen, aber auch aus Roboter und Mensch bestehen. Ziel des Projekts ist daher die Befähigung von Robotersystemen zur Bildung von Teams und kooperativen Übernahme von Aufgaben. Dazu werden die Ebenen von der Sensorik, der Sensordatenintegration, die Bereitstellung von Diensten bis hin zur aufgabenorientierten Planung betrachtet.

Beteiligte wissenschaftliche und industrielle Partner

- Sprecher: Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
- Sprecher: Prof. Dr.-Ing. Dominik Henrich
- Koordination: Julia Berger (Fraunhofer IGCV)
- Wissenschaftliche Partner:
 - Institut für Arbeitswissenschaft, Jun.-Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch, Universität der Bundeswehr (UniBW), München (bis 30.06.2018)
 - Institut für Arbeitswissenschaft, Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch, RWTH Aachen University (ab 01.07.2018)
 - Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Prof. Dr. Dominik Henrich, Universität Bayreuth
 - Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Technische Universität München
 - Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, Technische Universität München
 - Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
 - Lehrstuhl für Informationstechnik und Kommunikationselektronik (LIKE), Prof. Dr.-Ing. Jörn Thielecke, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
 - Lehrstuhl für Produktionsinformatik, Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp, Universität Augsburg
 - Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV, Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Augsburg (vormals Fraunhofer Projektgruppe RMV)

■ Assoziierte Partner:

- Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen (IIS), Prof. Dr.-Ing. Albert Heuberger

■ Industriepartner:

- Bertrandt Ingenieurbüro GmbH
- Cioplenu GmbH
- Framatome GmbH (vormals AREVA GmbH)
- Grenzebach Maschinenbau GmbH
- ITQ GmbH
- Industrie- und Handelskammer Schwaben
- Krones AG
- MAN Truck & Bus AG
- Mangelberger Elektrotechnik GmbH
- Mayser Sicherheitstechnik GmbH
- Metrilus GmbH
- Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG (ehemals Hefter Maschinenbau GmbH & Co. KG)
- MRK-Systeme GmbH
- PTM Mechatronics GmbH
- Roboception GmbH
- SALT Solutions AG
- Siemens Gerätewerk Erlangen (GWE)
- Software 4 Production GmbH
- Software Factory GmbH
- Stäubli Tec-Systems GmbH
- Teamware GmbH
- Yaskawa Europe GmbH, Division Robotics

1.2 Laufzeit, Fördersumme und Förderquote

Die geplante Laufzeit des Forschungsverbunds betrug drei Jahre, vom 01. Januar 2017 bis zum 31. Dezember 2019. Aufgrund von Verzögerungen im Projektablauf, insbesondere der Integration der Roboterplattform, wurde das Projekt um 6 Monate verlängert. Daher lief das Projekt schließlich vom 01. Januar 2017 bis zum 30.06.2020.

Die Förderquote beträgt 45,2 %, bei einer geplanten Fördersumme von 1.999 T€.

2 ANGABEN ZUM PROJEKT

2.1 Ausgangssituation und Motivation

Steigende Löhne in Verbindung mit manuellen Arbeitsvorgängen erfordern eine Automatisierung, vor allem in Hochlohnländern, um die Produktion dort erhalten zu können. Hierfür werden häufig Industrieroboter verwendet, die durch Ihre Kinematik für viele Anwendungsbereiche einsetzbar sind. Häufig werden diese Roboter hinter Zäunen und für eine bestimmte Aufgabe eingesetzt. Seit Beginn der Einführung der Mensch-Roboter-Kooperation, können bestimmte Roboter schutzzaunlos und im gleichen Arbeitsraum wie der Mensch arbeiten. Dies führt zu anderen Einsatzbereichen des Roboters, der dabei auch flexibler reagieren können muss, als bei einem Einsatz hinter einem Schutzzaun. Auch der Trend in Richtung „Mass Customization“ in Verbindung mit kleinen Losgrößen führt zu Flexibilitätsanforderungen, die im Gegensatz zu den Fähigkeiten herkömmlicher Automatisierungslösungen stehen.

Im Hinblick auf einen flexibleren Einsatz von Robotersystemen erfahren vor allem mobile Robotersysteme verstärkte Aufmerksamkeit. Diese sollen sich vor allem durch ihre Ortsflexibilität und Anpassungsfähigkeit auf sich verändernde Aufgaben auszeichnen. Dadurch bieten sie das Potential für eine bedarfsgerechte Automatisierung.

Die Weiterentwicklung dieser mobilen Robotersysteme hin zu einem hohen Autonomiegrad wird durch immer günstiger werdende Sensoren, insbesondere der Weiterentwicklung von 2D- und 3D-Kamerasystemen, gefördert. Dadurch kann es gelingen, dass ein wirtschaftlicher Einsatz dieser Systeme ermöglicht wird. Aufgrund der eingeschränkten Fähigkeiten eines einzelnen mobilen Robotersystems, z.B. durch ein Werkzeug oder die Traglast, kann das Potential nicht vollständig ausgeschöpft werden. Ein Lösungsansatz um dieser Herausforderung zu begegnen, besteht darin, Robotersysteme im Team zusammenarbeiten zu lassen. Dabei kann das Team aus mehreren Robotersystemen oder auch einem Robotersystem und einem Menschen bestehen. Der Gedanke des Roboterteams ist im Folgenden kurz zusammengefasst:

Ein mobiles Roboterteam ist der ad-hoc Zusammenschluss von mindestens zwei Akteuren, mit dem Ziel, eine gemeinsame Aufgabe innerhalb der Produktion zu bearbeiten. Die Teamzusammenstellung kann hierbei aus mehreren mobilen und nicht-mobilen Robotersystemen sowie dem Menschen bestehen. Die zur Aufgabenerfüllung notwendigen Fähigkeiten werden hierbei durch Emergenz innerhalb des Teams erreicht.

Ganz nach dem Wortlaut „TEAM – Together everyone achieves more“ kann die Leistung einzelner Teammitglieder durch die Zusammenarbeit im Team erhöht werden. Bezogen auf die Produktion soll daher das Ziel eine erhöhte Produktivität sein.

Durch die Ortsflexibilität der autonomen mobilen Robotersysteme entstehen neue Potentiale zur Unterstützung entlang der Wertschöpfungskette. So können beispielweise nicht-wertschöpfende Tätigkeiten, die bislang oft manuell durchgeführt werden, wie zum Beispiel die Kommissionierung, durch das Robotersystem übernommen werden, sodass sich der Mitarbeiter auf die komplexen Tätigkeiten konzentrieren kann. Auch hier bietet die Bildung von Teams Potentiale, da ein einzelnes System in seinen Fähigkeiten beschränkt ist (z.B. Art des Greifers) und somit der Unterstützung eines weiteren Teammitglieds bedarf. Des Weiteren können auf die Kommissionierung

folgende Prozesse, wie die Qualitätsprüfung oder leichte Montagearbeiten, bereits auf dem Weg zur Bearbeitungsstation durch das mobile Robotersystem durchgeführt werden, wodurch sogar Transportzeiten zu wertschöpfenden Zeiten überführt werden.

2.2 Zielsetzung des Forschungsverbunds

Das übergeordnete Ziel des Forschungsverbunds war die Erhaltung des Produktionsstandorts Deutschland durch die flexible Automatisierung der Produktion mit Hilfe der Bildung von mobilen Roboterteams.

Das Ziel des Forschungsverbunds FORobotics bestand darin, mobile Robotersysteme dazu zu befähigen, dass sie ad-hoc in einem Team kooperieren können. Ein Team kann dabei aus mehreren Robotersystemen sowie aus Roboter und Mensch bestehen. Durch die Teambildung in der Produktion können die verschiedenen Fähigkeiten der unterschiedlichen Teammitglieder optimal genutzt werden, wodurch die Gesamtleistung des Teams zunimmt. In der nachfolgenden Abbildung 1 werden die unterschiedlichen Teamarten, heterogenes und homogenes Team, schematisch dargestellt.

Bei Bildung von heterogenen Teams mit dem Menschen können vor allem die Stärken des Menschen (wie z. B. analytisches Denkvermögen, Sinneswahrnehmungen und Kreativität) mit den Stärken des Roboters (wie z.B. Präzision oder Ausdauer) kombiniert genutzt werden. Die Bildung homogener Teams durch mehrere Robotersysteme kann einerseits zur Skalierung der Fähigkeiten einzelner Systeme, wie z.B. dem gemeinsamen Tragen eines Gegenstands, oder der Kombination verschiedener Fähigkeiten durch zum Beispiel verschiedene Werkzeuge, dienen.

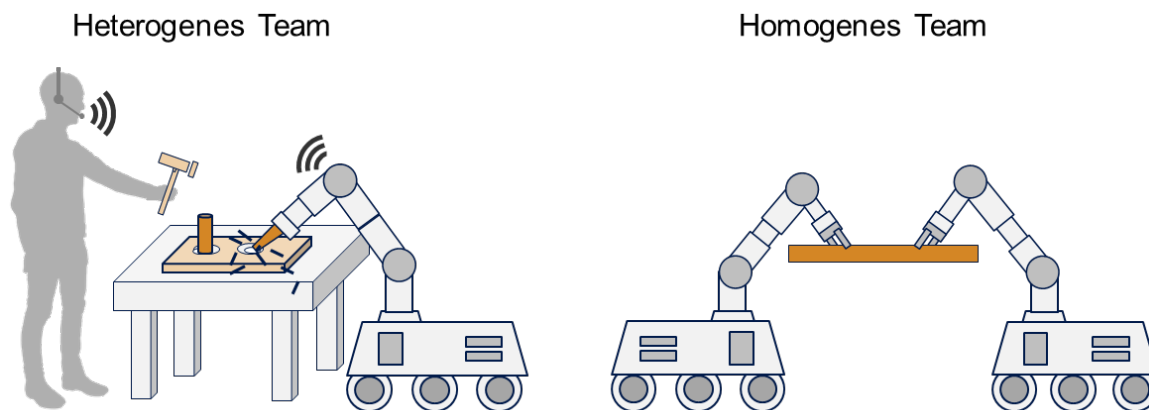


Abbildung 1: Teamformen ad-hoc kooperierender mobiler Robotersysteme

Um mobile Robotersysteme für den ad-hoc kooperierenden Einsatz zu befähigen, wurden im Projekt verschiedene Bereiche untersucht. Dazu wurden zu Beginn vier wesentliche Ziele definiert:

1. *Entwicklung und Erweiterung mobiler Roboterplattformen zu ortsflexiblen, individuellen Einheiten:*

Zu Beginn des Projekts gab es bereits (wenige) mobile Roboterplattformen, die meist für einen Anwendungsfall ausgelegt sind. Aufbauend auf existierenden Systemen sollten die Roboterplattformen weiterentwickelt und erweitert werden, um einen ortsflexiblen Ein-

satz bei sich verändernden Aufgaben zu gewährleisten. Dazu war es das Ziel Werkzeugsysteme in die Plattform zu integrieren, die das Profil der mobilen Plattform und seine Fähigkeiten definieren. Um mit anderen Ressourcen Informationen auszutauschen und deren Fähigkeiten nutzen zu können, muss eine vereinheitlichte Beschreibung der Betriebsmittel und eine globale Kommunikationsstruktur aufgebaut werden.

2. *Integration und Qualifizierung mobiler Plattformen zur Parallelisierung von verarbeitenden (Fertigung und Montage) und logistischen Prozessschritten*

Um das Ziel zu erreichen, die wertschöpfenden Zeiten zu erhöhen, sollte das mobile Robotersystem dazu befähigt werden, bereits während der Fahrt wertschöpfende Tätigkeiten, wie z.B. die Vormontage von Komponenten oder die Aufnahme von Qualitätsdaten, durchführen zu können. Kann dies nicht mit dem vorhandenen Werkzeugsystem erfolgen, so muss die Plattform fähig sein, einen Werkzeugaustausch durchzuführen oder mit anderen Plattformen zu kooperieren, um die Arbeit kooperativ durchzuführen. Damit die Bewegungen des Manipulators während der Fahrt erfolgen können, sollten Strategien entwickelt werden, die zur Absicherung der Plattform dienen.

3. *Entwicklung von Planungsalgorithmen zur kooperativen Aufgabendurchführung*

Ausgehend von dem zu erledigenden Auftrag, der in ein Planungssystem eingegeben wird, sollte eine dynamische Zusammenstellung der Teams erfolgen. Dazu wird der Auftrag analysiert und mit den Fähigkeiten der zur Verfügung stehenden Ressourcen abgeglichen und daraufhin die Aufgaben auf die Ressourcen im Team verteilt. Für diesen Abgleich und die Zuordnung der Aufgaben sind als planungsseitige Voraussetzungen digitale Betriebsmittel- und Anlagenmodelle notwendig, die neben dem eigentlichen Planungsalgorithmus für diese Zielstellung entwickelt werden müssen.

4. *Schaffung neuartiger Mensch-Maschine-Schnittstellen*

Der Mensch als ein mögliches Teammitglied muss die Möglichkeit haben mit dem technischen System zu kommunizieren, um die Änderung an einer Aufgabe vorzunehmen oder Befehle einzugeben. Dazu wurden innovative Mensch-Maschine-Schnittstellen betrachtet, die es dem Anwender ermöglichen sollen, mit möglichst wenig Vorkenntnissen Informationen mit dem System auszutauschen. Dazu gehört einerseits die Übergabe von Informationen an das System durch den Nutzer (Mensch -> Maschine), wie bspw. ein einfacher Stopp-Befehl, und andererseits die Darstellung von Informationen vom System an den Nutzer (Maschine -> Mensch). Durch diese Ansätze soll vor allem die Nutzerakzeptanz gegenüber dem System gesteigert werden.

Da diese genannten Ziele noch ein breites Wirkungsspektrum zuließen, wurde im ersten Jahr ein zentraler Use Case basierend auf den Anwendungsfällen dreier Firmen definiert, anhand dessen die weitere Erarbeitung der Ergebnisse erfolgte.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden mehrere Teilprojekte definiert, deren Struktur im nächsten Abschnitt erläutert wird.

2.3 Struktur des Forschungsverbunds

Analog zu den in der Zielsetzung angestrebten Zielen des Projekts wurde die Struktur des Forschungsverbunds aufgebaut, wie in Abbildung 2 dargestellt. Der Forschungsverbund ist in sieben Teilprojekte untergliedert, wobei TP K das Teilprojekt der Koordinationsstelle und TP D das Teilprojekt des Demonstrators beschreibt. Diese abgebildete Struktur wurde während des Projekts

weitestgehend eingehalten, einzelne Inhalte wurden nach Bedarf angepasst und es wurden verstärkt auch teilprojektübergreifende Themen bearbeitet, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben.

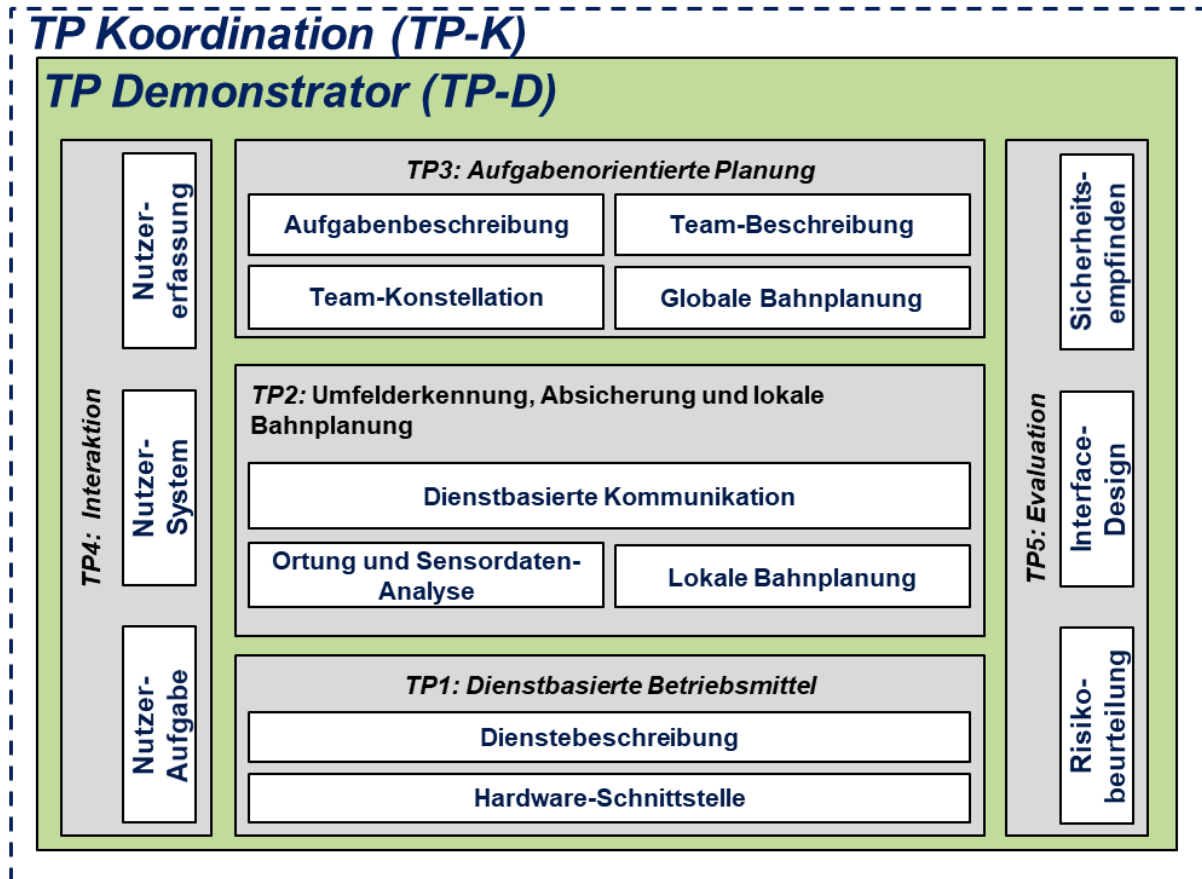


Abbildung 2: Struktur des Forschungsverbunds

Inhalt des TP 1 war es, hardwarenahe Basisdienste zur Verfügung zu stellen, wozu die Fähigkeiten und Eigenschaften der Hardwareressourcen und Peripheriekomponenten, sprich der Betriebsmittel, beschrieben werden müssen. Dienste sollen für die einzelnen Komponenten, darunter sowohl Manipulator als auch Sensoren, zur Verfügung stehen. Dazu gilt es eine Softwarearchitektur zu entwerfen, mit der diese Beschreibung der Betriebsmittel erfolgen kann.

Die in TP 1 dargestellten Basisdienste wurden in TP 2 von den jeweiligen Plattformen verwendet, wodurch die Kommunikation zu anderen Plattformen und die lokale Bahnplanung erfolgen kann. Dazu gehört die kollisionsfreie Trajektorienplanung für den Manipulator und die Anpassung der Navigationsstrategie beim Auftreten unerwarteter Hindernisse. Das Auftreten eines unerwarteten Hindernisses beispielsweise wird über die ebenfalls in TP 2 betrachtete Sensorintegration und -interpretation ermöglicht. Dabei werden beispielsweise aus Sensorrohdaten, wie 2D- oder 3D-Punktwolken, konkrete Objekte (z. B. Bauteile) generiert. Diese Sensorinformationen werden dann einerseits an TP 3 zur globalen Bahnplanung als auch an TP 4 zur Interaktion weitergegeben. Ein weiteres Themengebiet in Teilprojekt 2 stellte auf Basis von Diskussionen, die Absicherung der Plattform dar.

TP 3 war verantwortlich für das übergeordnete Planungssystem zur Aufgabenzuteilung und die globale Bahnplanung der Ressourcen. Ausgehend von einer eingehenden Produktionsaufgabe, z. B. eine Kommissionier- oder Montagefähigkeit, wird ein Team zusammengestellt, das diese Aufgabe erfüllen soll. Dazu muss die Produktionsaufgabe in Teilschritte zerlegt werden und mit den Fähigkeiten der zur Verfügung stehenden Betriebsmittel – beschrieben in TP 1 – abgeglichen werden. Des Weiteren müssen fehlende Teilschritte identifiziert und hinzugefügt werden. Insgesamt wird hier auf dem Ansatz der aufgabenorientierten Programmierung aufgebaut. Zur Teamzusammenstellung werden neben technischen Voraussetzungen (Greifbarkeit, Tragkraft) auch aktuelle Informationen, wie der Ladezustand oder aktuell durchgeführte Tätigkeit benötigt. In TP 3 wird daher ein automatisiertes Planungssystem erstellt, mit dem die Aufgabe zunächst in Teilschritte zerlegt wird, fehlende Teilschritte hinzugefügt werden und diese dann mit den Fähigkeiten der Betriebsmittel abgeglichen werden. Daraufhin erfolgen die Teamzusammenstellung und die globale Bahnplanung.

Entlang der schichtweise aufgebauten Teilprojekte 1-3, gab es die übergreifenden Teilprojekte 4 (Interaktion) und 5 (empirische Nutzerevaluation).

Das Teilprojekt 4 beschäftigte sich mit den verschiedenen Möglichkeiten zur Interaktion zwischen Mensch und Roboter (Nutzer-System). Die Interaktion zwischen mehreren technischen Systemen wurde nicht weiter betrachtet. Bezogen auf die Interaktion zwischen Mensch und Roboter war es Aufgabe des Teilprojekts, (mobile) Robotersysteme zur Interaktion zu befähigen, sodass einerseits der Nutzer Befehle an das System übergeben kann und andererseits das Robotersystem Informationen an den Nutzer geben kann, sodass für den Nutzer der Umgang mit dem Robotersystem erleichtert wird. Einen weiteren Aspekt bildet das Programmieren des Roboters durch den Nutzer im Falle von Aufgaben, die nicht über das Planungssystem aus TP 3 generiert werden können, weil bspw. nicht genügend digitale Informationen zu der Aufgabe vorhanden sind.

Das weitere übergreifende Teilprojekt 5 war für die empirische Nutzerevaluation zuständig. Durch eine kontinuierliche Integration der Nutzer in die Forschungsarbeiten durch Nutzerstudien, soll die Nutzerakzeptanz des Gesamtsystems, aber auch der einzelnen Aspekte gewährleistet werden. Dieses Teilprojekt unterlag daher einer starken Verbindung zu allen anderen Teilprojekten. Neben der Durchführung von Nutzerstudien, wurde in diesem Teilprojekt die Risikobeurteilung für Einzelaspekte und das Gesamtsystem durchgeführt. Gemeinsam mit TP D wurden außerdem Evaluationen bei den Anwenderfirmen vor Ort durchgeführt.

Das Teilprojekt D war für die prototypische Umsetzung der in den anderen 5 Teilprojekten entwickelten Ergebnisse zuständig. Aus den verschiedenen Anwendungsfällen der einzelnen Anwender im Forschungsverbund wurde im ersten Projektjahr ein gemeinsamer Gesamtdemonstrator abgeleitet, an dem die Ergebnisse dargestellt werden. Ausgehend von der Arbeitssystemanalyse, in denen die Anwendungsfälle der Partner untersucht wurden, werden aus den Anwendungsfällen einzelne Aspekte herausgegriffen und in einem Use Case kombiniert. Aufgabe des Teilprojekts Demonstrator war es, in enger Zusammenarbeit mit den Partnern diesen Use Case in einen lauffähigen Demonstrator zu überführen. Dabei ist vor allem die enge Zusammenarbeit sowohl zu den Anwenderfirmen als auch den Entwicklungspartnern des Forschungsverbunds notwendig gewesen. Des Weiteren ist die Abstimmung mit Teilprojekt 5 erforderlich, da mit Hilfe des Demonstrators über die Evaluierung wichtige Erkenntnisse zur Nutzerakzeptanz gewonnen werden.

3 SITUATIONSBERICHT

3.1 Zusammenfassung der Arbeiten im Projekt

Zunächst wurde in das Projekt in den wie in Abschnitt 2.3 beschriebenen Teilprojekten mit den Arbeiten begonnen. Da die zu bearbeitenden Themen sehr viele Möglichkeiten bieten, jedoch auch eine starke Vernetzung der Teilprojekte untereinander festzustellen war, wurde sich darauf geeinigt, einen zentralen Use Case zu identifizieren, an dem die Ergebnisse erarbeitet werden sollen und im Teilprojekt Demonstrator zusammengefasst werden. Daher wurde im ersten Projektjahr basierend auf den Anwendungsfällen der Anwenderfirmen ein zentraler Use Case ausgearbeitet, an dem die zentralen Inhalte des Projektes erarbeitet wurden.

Bei dem Use Case handelt es sich um eine Regallagerkommissionierung, die aus den Anwendungsfällen bei Mey Maschinenbau, Krones und MAN hervorgeht. Bei Mey Maschinenbau werden Schäferkisten kommissioniert, bei MAN werden Einzelteile auf eine Setplatte gesetzt und bei Krones ein Motor aus dem Regal entnommen. Anschließend soll eine fahrtbegleitende Vormontage von MAN-Teilen erfolgen. Im dritten Schritt erfolgt die Teamarbeit, wobei ein Mensch gemeinsam mit einem Roboter einen Motor in einen Montagering fügt.

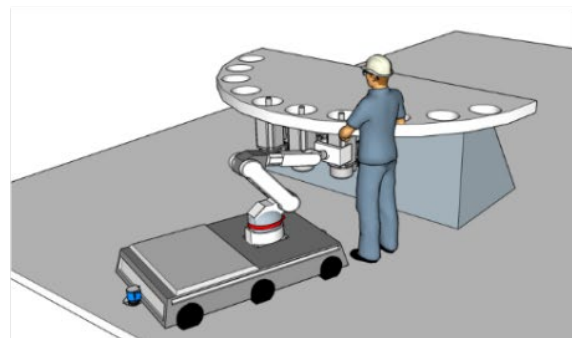
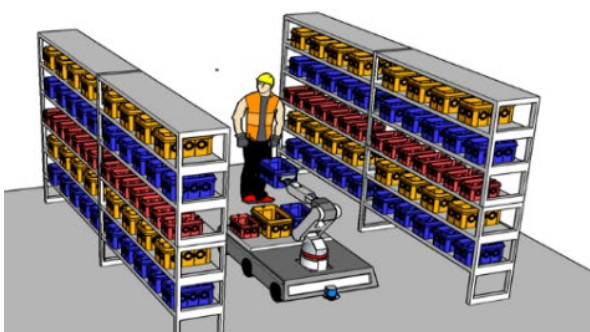


Abbildung 3: Darstellung des Use Cases

Dieser Use Case wurde bei der zweiten Zwischenbegutachtung demonstriert, jedoch ohne die fahrtbegleitende Vormontage. Eine Teamarbeit zwischen Mensch und Roboter bestand daher während der ersten Demonstration bei der Motormontage.



Abbildung 4: Demonstration des Use Cases bei zweiter Zwischenbegutachtung

Die Demonstration zeigt ein Zusammenspiel zwischen den unterschiedlichen Teilprojekten. So werden beispielsweise im ersten Teilprojekt die Fähigkeiten des Roboters zur Verfügung gestellt,

aus dem zweiten Teilprojekt kamen die Ergebnisse für den Greifvorgang, im dritten Teilprojekt wird der am Terminal eingegebene Auftrag verarbeitet, das vierte und fünfte Teilprojekt waren für die Mensch-Roboter-Interaktion zuständig. Auch die industriellen Partner waren durch ihre Technik und Expertise involviert: Yaskawa und Grenzebach integrierten den Roboter, der Greifer selbst und seine Schnittstellen wurden von der Firma PTM Mechatronics betreut, Hefter Maschinenbau GmbH war als Anwender tätig und mit seiner Expertise als Sondermaschinenbauer für die Konstruktion und Fertigung von Bauteilen, wie dem Bauchladen des Roboters oder Greiferkomponenten tätig. Roboception unterstützte bei der kamerabasierten Bildverarbeitung, Bertrandt bei der Navigation. Die Firmen Software Factory und software4production stellten Technik und Know-How für das Planungssystem zur Verfügung. Dadurch wird erkennbar, dass fast alle Partner an diesen Arbeiten beteiligt waren.

Da das Projekt auch die ad-hoc Zusammenarbeit innerhalb eines Teams betrachtet, wurde insbesondere im dritten und vierten Projektjahr dieses Thema nochmals näher beleuchtet. So wurde analysiert, wie die Interaktionstechnologien als Eingang für eine Zusammenarbeit verwendet werden können und wie das Planungssystem bzw. auch das Gesamtsystem darauf reagieren muss. Dies wird in Teilprojekt 4 ausführlicher erläutert. Ein Fokus des dritten Projektjahres bestand in der Evaluation der Ergebnisse aus den ersten beiden Projektjahren bei den Anwenderfirmen im realen industriellen Umfeld. Daher wurde das Projekt im dritten und vierten Jahr zweiteilig fortgeführt. Es wurde an den Forschungsthemen anhand der Forschungsplattform weitergearbeitet und die Evaluation mit Hilfe der „industriellen Plattform“ durchgeführt. Die Forschungsplattform ist mehr Sensorik, wie z.B. Kamerasystemen zur Aufnahme von Gesten, des Beamer, etc. ausgestattet. Die industrielle Plattform besteht aus den Hauptkomponenten Roboter und Kamerasystem zum Greifen. Der Unterschied der Plattformen war notwendig, da die Energieressourcen der Forschungsplattform nicht für die Evaluation ausreichen. Die Forschungsplattform mit seinen Komponenten zeigt nachfolgende Abbildung.

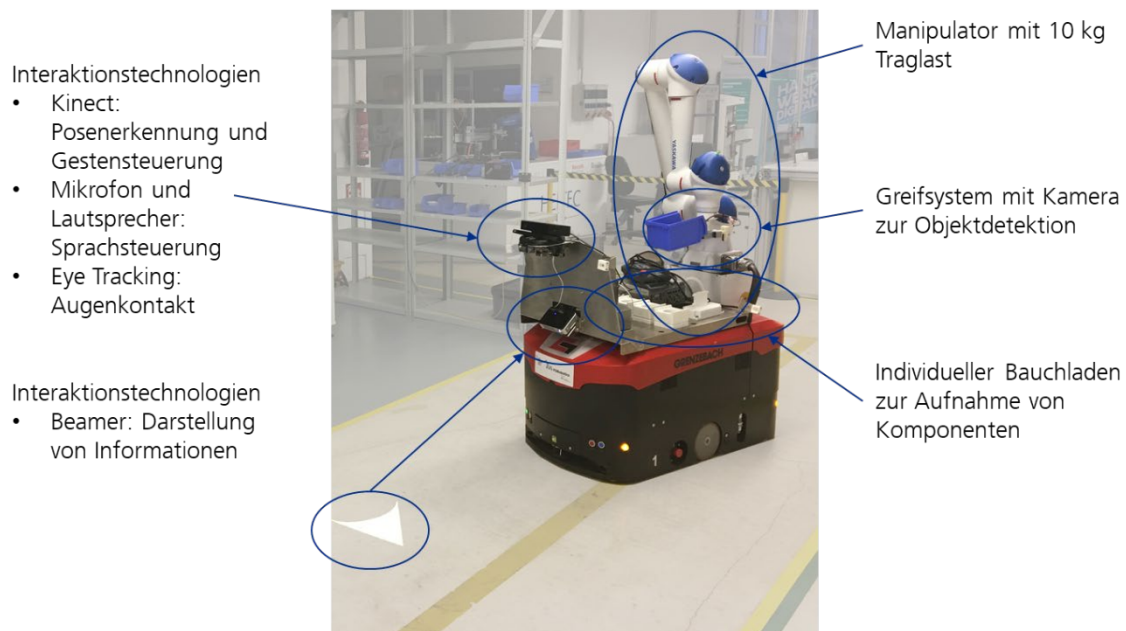


Abbildung 5: Forschungsplattform mit seinen Komponenten

Zur weiteren Betrachtung der ad-hoc Fähigkeiten und der Bildung eines Roboter-Roboter-Teams, wurde der Use Case der Regallagerkommissionierung erweitert. Dabei unterstützt nun ein Roboter

den anderen Roboter, wenn dieser ein Objekt nicht greifen kann, da er mit dem falschen Greifer ausgestattet ist. Daher stellt der Roboter mit dem richtigen Greifer bei Bedarf das Objekt auf die andere Plattform. Eine andere beispielhafte ad-hoc Situation stellt der Fehlerfall dar, bei dem das Gesamtsystem reagieren muss. So wurde im dritten Projektjahr dieser Fall betrachtet und unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung gestellt, damit umzugehen. Dies kann durch Teleoperation oder ein Hilfe-Tutorial geschehen, was von dem Steuerungssystem angesprochen wird. Dies wird näher in den Teilprojekten beschrieben. Auch in diesem dritten und vierten Jahr waren die Partner in den verschiedenen Bereichen eingebunden. Dabei blieben die meisten Partner, wie oben geschrieben, eingebunden. Die Anwender und Yaskawa waren aufgrund der Evaluationen intensiver eingebunden. Außerdem wurde an den Interaktionstechnologien gearbeitet, bei denen Teamware und ITQ mitarbeiteten. Des Weiteren wurden die neuen Partner eingebunden. Cioplenu zeigte die Darstellung der Arbeitsabläufe in der Montage für die Mensch-Roboter-Zusammenarbeit, Siemens GWE arbeitet an der Objekterkennung zum Greifen von Gegenständen. Die Zuordnung der Partner zeigt die nachfolgende Abbildung 6

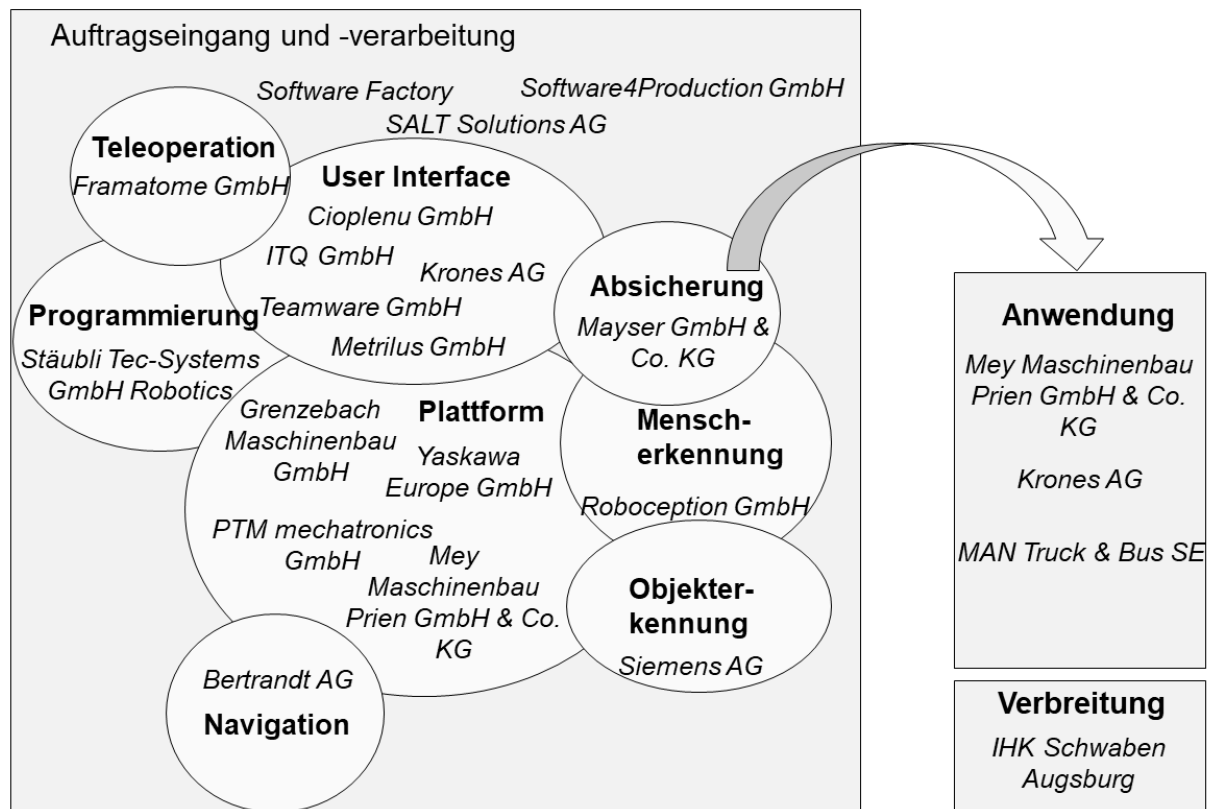


Abbildung 6: Struktur der Zusammenarbeit und Zuteilung der Partner zu Themenbereichen

4 ERGEBNISSE DER TEILPROJEKTE

4.1 TEILPROJEKT 1 – DIENSTBASIERTE BETRIEBSMITTEL

Lisa Heuss, Sebastian Roder, Michael Zäh

4.1.1 Allgemeine Angaben

Beteiligte Industriepartner:

- Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG
- ITQ GmbH
- Krones AG
- MAN Truck & Bus AG
- Mayser GmbH & Co. KG
- SALT Solution AG
- Teamware GmbH
- Yaskawa Europe GmbH, Robotics Division

Projektleitung:

Prof. M. F. Zäh, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München

4.1.2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Das Verbundprojekt FORobotics ermöglichte die Zusammenarbeit von Menschen und Robotern als Teamverbund in einem industriellen Umfeld. Für die individuelle Konfiguration der Roboter sowie die Ad-hoc-Zusammenstellung der Teams wurde eine einheitliche Basis zur Beschreibung der Fähigkeiten und Eigenschaften der Akteure und Betriebsmittel entwickelt. Die definierte Beschreibungsstruktur dient als Grundlage für eine lösungsneutrale Formulierung der Produktionsaufgabe und einen Abgleich mit den dafür notwendigen Akteuren und Betriebsmitteln. Die Fähigkeiten dieser werden durch funktionale, produktionstechnische Primitiva, wie etwa „Halten“, „Messen“ oder „Montieren“, beschrieben. Durch die Analyse industrieller Anwendungsfälle in der Produktion wurden mögliche Synergien und potentielle Kooperationsmöglichkeiten zwischen Menschen und Robotern identifiziert. Die Produktionsaufgaben – auch als Jobs bezeichnet – werden zur Bearbeitung durch die Akteure in Aufgaben und Prozessschritte gegliedert. Dabei besteht jede Produktionsaufgabe aus mehreren Aufgaben und jede Aufgabe aus mehreren Prozessschritten. Diese bilden die Basis für die Definition der Fähigkeiten der einzelnen Betriebsmittel und Akteure. Jeder Akteur eignet sich auf Basis seines Fähigkeiten-Sets zur Ausführung unterschiedlicher Produktionsaufgaben. Die Fähigkeiten der Akteure werden zur Ermöglichung einer dienstbasierten Kommunikationsarchitektur standardisiert an die höhergelegene Planungs- und Steuerungsebene kommuniziert. So können die Akteure von dieser zielgerichtet alleine oder im Teamverbund in der Fabrik eingeplant werden. Zusätzlich ist die Bearbeitung von an den Roboter übergebenen Produktionsaufgaben durch ein geeignetes Aufgaben-Management auf Betriebsmittel-Ebene zu koordinieren.

4.1.3 Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Teilprojekts 1 (TP 1) vorgestellt. Zu Beginn jedes Arbeitspakets (AP) werden zusammenfassend die Ergebnisse der ersten beiden Projektjahre beschrieben. Anschließend wird detaillierter auf die Arbeitspakete eingegangen, die im dritten Projektjahr bearbeitet wurden, und die erzielten Ergebnisse werden vorgestellt.

Arbeitspaket 1.1: Umwelt und Produktionsumgebung

Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes erfolgte maßgeblich im ersten Projektjahr und die Ergebnisse wurden bereits ausführlich im ersten Zwischenbericht (vgl. Reinhart et al. 2017) beschrieben. Das Ziel lag in der Arbeitssystemanalyse der bestehenden Produktionsanlagen der Industriepartner mit Fokus auf Bereiche, in denen mobile Roboterplattformen effizient eingesetzt werden können (Leichtmann et al. 2018). Konkret wurden folgende Produktionsanlagen bzw. Arbeitsabfolgen analysiert:

Kommissionierung

- Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG : Anhand einer Stückliste werden Betriebsmittel aus einem Kleinteilelager (aus Schüttgutboxen) geholt und entweder zum Warenausgang oder zum Montageplatz transportiert.

Vormontage von Kleinteilen und Montage im Mensch-Roboter-Teamverbund

- Krones AG: Servomotoren werden vom Kommissionierwagen zu einem Behältertisch transportiert und auf diesem montiert.
- MAN Truck & Bus AG: Kleinteile werden aus Schüttgutboxen entnommen und auf einer Setplatte vormontiert.

Bestückung von Werkzeugmaschinen und Nachbearbeitung des Werkstücks

- Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG : Werkstücke (Ausgangsmaterial) werden in eine Werkzeugmaschine eingelegt und das bearbeitete Werkstück wird entnommen.

Die ermittelten Arbeitsabfolgen wurden auf übereinstimmende Tätigkeitsbereiche untersucht, aus denen der finale Use Case abgeleitet werden konnte. Die Beschreibung des Use Cases ist im Bericht zum TP D zu finden.

Weiter diente die Arbeitssystemanalyse nach Leichtmann et al. (2018) als Grundlage für die Auswahl der notwendigen Betriebsmittel und somit als Ausgangssituation für die Flexibilisierung der Produktionsumgebung (vgl. AP 1.2).

Die Analyseergebnisse wurden zusätzlich in gemeinsamen Workshops mit TP 5 auf menschenzentrierte Aspekte hin untersucht und Gestaltungshinweise für die Einführung mobiler, adhoc kooperierender Roboterplattformen abgeleitet. Die Ergebnisse sind ausführlich in der Beschreibung von TP 5 in AP 1 dargestellt.

Im Projektverlauf stellte sich im Austausch mit den an FORobotics beteiligten Anwendungspartnern heraus, dass Anwendungsfälle für innovative Robotik-Lösungen meist ohne ein systematisches Vorgehen ausgewählt werden. Insbesondere die einfache und schnelle Abschätzung von Auswirkungen auf Kosten, Qualität oder Entlastung des Personals innerhalb eines Prozesses stellen eine Herausforderung dar. Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner MAN im dritten Projektjahr eine einfach anzuwendende Methodik für die Identifikation und Bewertung von Anwendungsfällen erarbeitet (siehe AP 1.1.3).

AP 1.1.3 Auswirkungen von mobilen Roboterplattformen

Der Einsatz von innovativen Robotik-Lösungen bietet erhebliches Potential zur Steigerung von Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit heutiger Unternehmen. Die Auswahl geeigneter Anwendungsfälle stellt für Unternehmen jedoch eine Herausforderung dar. Methoden wie die im ersten Projektjahr gemeinsam mit TP 5 durchgeführte Arbeitssystemanalyse (vgl. Leichtmann et al. 2018; Reinhart et al. 2017) oder konventionelle Verfahren für die Planung und Auslegung von Montagesystemen fokussieren in der Regel einen spezifischen Prozess. Der wichtige und notwendige vorgelagerte Schritt zur Auswahl dieses spezifischen Prozesses wird von diesen Ansätzen nicht betrachtet. Es fehlte an dieser Stelle an einem einfach anwendbaren Werkzeug zur Bewertung notwendiger Umsetzungsaufwände und deren Gegenüberstellung mit den erwarteten Auswirkungen als Basis für die Auswahl eines vielversprechenden Anwendungsfalls. Aus diesem Grund wurde gemeinsam mit dem Industriepartner MAN eine Methodik zur Identifizierung und Bewertung von Anwendungsfällen für die Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) erarbeitet. Die Methode eignet sich jedoch genauso zur Identifikation von Anwendungsfällen für mobile Roboterplattformen. Methodik und Ergebnisse wurden mit TP 5 diskutiert und abgestimmt. Die entwickelte Methodik und deren Einsatz beim Industriepartner MAN werden im Detail von Baldauf (2019) vorgestellt. Auf dieser Basis werden im Folgenden die Ergebnisse zusammengefasst:

Auf Basis einer Literaturrecherche und unter Einbeziehung der industriellen Anforderungen am Beispiel von MAN wurden zuerst die Anforderungen an die Methodik ermittelt. Die Methodik soll ein einfaches Werkzeug sein, das mit begrenztem Aufwand die Identifikation von MRI-Anwendungen in großen Produktionssystemen ermöglicht. Dementsprechend wurde ein vierstufiges Vorgehen entwickelt. Abbildung 7 zeigt die entstandene Methodik in der Übersicht. Im Folgenden werden die einzelnen Teilschritte der Methodik im Detail vorgestellt.



Abbildung 7: Überblick über die Methodik zur Identifizierung und Bewertung von MRI-Anwendungsfällen nach Baldauf (2019)

Der erste Schritt befasst sich mit der Identifikation potentieller MRI-Anwendungen in einem großen Produktionssystem, beispielsweise einem ganzen Montageband wie im Falle von MAN. Ziel ist hierbei die Bestimmung der Prozesse, welche ein hohes MRI-Potential besitzen. Hierzu wurde ein stufenweiser Ansatz gewählt. Zuerst werden die unterschiedlichen Montagesysteme des Produktionssystems betrachtet und bewertet. Anschließend werden die einzelnen Arbeitsplätze des Montagesystems mit dem höchsten MRI-Potential im Vergleich zueinander bewertet. Für den am besten bewerteten Arbeitsplatz findet dann eine Detailbewertung der dort auszuführenden Einzelprozesse hinsichtlich ihrer Eignung für eine MRI statt. Für jede Betrachtungsebene (Montagesystem, Arbeitsplatz, Prozess) wurde ein ausführlicher Katalog mit Bewertungskriterien erarbeitet.

Der Einsatz von MRI kann hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Qualität und Ergonomie zu Verbesserungen führen. Für eine ganzheitliche Bewertung wurden aus diesem Grund Bewertungskriterien aus diesen drei Dimensionen herangezogen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Beispielhafte Kriterien der unterschiedlichen Betrachtungsebenen und Bewertungsdimensionen nach Baldauf (2019)

| | | Bewertungsdimension | | |
|-------------------|----------------|--------------------------|----------------------|----------------------------|
| | | Wirtschaftlichkeit | Qualität | Ergonomie |
| Betrachtungsebene | Montage-System | Produktionsvolumen | Direktläuferquote | Körperhaltung |
| | Arbeitsplatz | Produktvarianten | Nacharbeitsquote | Monotone Aufgaben |
| | Prozess | Kosten der Arbeitsmittel | Wiederholgenauigkeit | Gefährliche Betriebsstoffe |

Die einzelnen Dimensionen sowie die untergeordneten Bewertungskriterien können innerhalb der Methodik unterschiedlich gewichtet werden, um die spezifischen Anforderungen eines Anwenders mit einzubeziehen. In den anschließenden drei Schritten wird nur noch der identifizierte Prozess mit dem höchsten MRI-Potential weiter betrachtet.

Im zweiten Schritt wird die Umsetzbarkeit des identifizierten MRI-Anwendungsfalls bewertet. Hierzu wurde ebenso auf Basis einer Literaturrecherche ein Kriterienkatalog erarbeitet, welcher eine Abschätzung der zur Umsetzung der MRI-Anwendung erforderlichen Aufwände ermöglicht. Dieser setzt sich aus prozess- sowie produktbezogenen Bewertungskriterien zusammen. Der Erfüllungsgrad der Bewertungskriterien gibt die MRI-Eignung des Prozesses wieder und ermöglicht somit eine Aussage, ob der Prozess mit Hilfe von MRI sinnvoll (teil-)automatisiert werden kann.

Im dritten Schritt werden die Auswirkungen der geplanten Automatisierung des identifizierten Prozesses abgeschätzt. Hierzu werden dieselben Bewertungskriterien wie im ersten Schritt herangezogen. Der geplante MRI-Prozess wird zuerst bewertet und anschließend mit dem bestehenden Prozess verglichen. Auf diese Weise wird dem Anwender ein effizientes Werkzeug an die Hand gegeben, um abzuschätzen, welche positiven Auswirkungen bezogen auf die Dimensionen Wirtschaftlichkeit, Qualität und Ergonomie durch eine Automatisierung mit Hilfe von MRI erwartet werden können.

Im vierten Schritt erfolgt abschließend eine erste Berechnung der Kosten zur Umsetzung der MRI-Anwendung. Als geeignete Kennzahlen wurden hierzu die statische Amortisationszeit, der Maschinenstundensatz und die Montagestückkosten identifiziert. Alternativ ist auch die Nutzung unternehmensinterner Tools zur Investitionsrechnung denkbar.

Die Methodik zur Identifikation und Bewertung von MRI-Anwendungsfällen wurde im Anschluss bei MAN evaluiert. Ausgehend von drei Montagesystemen innerhalb der Achsmontage wurde mit Hilfe der Methodik ein Prozess ausgewählt. Der identifizierte Prozess wurde anschließend prototypisch mit einem kollaborierenden Roboter automatisiert. Eine detailliertere Vorstellung des ent-

standenen Demonstrators erfolgt in TP D. Die von der Methodik vorhergesagten Umsetzungspotentiale, Auswirkungen sowie Kosten für die MRI-Anwendung wurden durch die reale Umsetzung bestätigt. In Summe konnten so die zu Beginn spezifizierten Anforderungen erfüllt und ein effizientes Werkzeug für die Identifikation und Bewertung zukünftiger MRI-Anwendungsfälle geschaffen werden. (Baldauf 2019)

Arbeitspaket 1.2: Systemkomponenten und Betriebsmittel

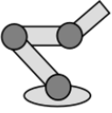

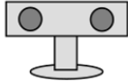
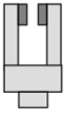

Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes erfolgte hauptsächlich im ersten und zweiten Projektjahr. Die Zielsetzung des APs 1.2 beinhaltet den Entwurf einer allgemeingültigen Beschreibungsform für die im Teamverbund eingebundenen Akteure und Betriebsmittel.





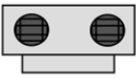
Zu diesem Zweck wurde auf Basis der in AP 1.1 analysierten Arbeitssysteme eine Klassifizierung der Betriebsmittel vorgenommen. Für die ermittelten Betriebsmittelklassen wurden Beschreibungsformen entworfen und die Basisfunktionalitäten einzelner Betriebsmittel wurden an der Demonstratorplattform des *iwb* implementiert. In den untersuchten Produktionssystemen wird eine Vielzahl unterschiedlicher Betriebsmittel eingesetzt. Als Betriebsmittel werden dabei alle physischen Entitäten bezeichnet, die an der Lösung einer Aufgabe beteiligt sind, z. B. Roboter, Sensoren, Aktoren und Informationsverarbeitungseinheiten. Zum Aufbau des semantischen Verständnisses der Umgebung soll jedes Betriebsmittel einer abstrakten, übergeordneten Klasse zugeordnet werden.

Die Klassifizierung von Betriebsmitteln zum Aufbau der mobilen Roboterplattformen erfolgte anhand des eCl@ss-Standard (eCl@ss e.V. 2018). Die eCl@ss ist ein ISO/IEC-normenkonformer Industriestandard für die Klassifizierung von Produkten und Dienstleistungen. Abbildung 8 gibt eine Übersicht über die am *iwb*-Demonstrator verwendeten Betriebsmittel im mobilen Robotersystem. Die eCl@ss ist hierarchisch aufgebaut, Oberklassen vererben ihre Eigenschaften an Unterklassen, beispielsweise vererbt Hauptgruppe 27-38 Robotik/Montage an Gruppe 27-38-01 Roboter, welche wiederum an die Klassifikationsklasse 27-38-01-01 Knickarmroboter vererbt. (siehe auch Reinhart et al. 2017, 2018; Lehnert 2017; Wilde 2018)

Um neben den oben beschriebenen Komponenten auch Menschen als Ressourcen im Produktionsumfeld einzuordnen, wurde der internationale ISCO-08-Standard herangezogen (International Labour Organization 2012). Die Einteilung erfolgt anhand der Aufgaben und Eingriffsberechtigungen im Produktionssystem. Diese Unterteilung nach produktionssystemspezifischen Berechtigungen ist bei vielen Maschinen und Anlagen bereits umgesetzt, beispielsweise als Benutzergruppen bei Werkzeugmaschinen. (siehe auch Reinhart et al. 2017, 2018)

Die beiden Beschreibungsformen für Menschen und technische Betriebsmittel wurden anschließend in einem gemeinsamen objektorientierten Datenmodell zusammengeführt, aufbauend auf der ISCO-08 (International Labour Organization 2012) und der eCl@ss (eCl@ss e.V. 2018). Auf diese Weise wird eine einheitliche Beschreibungsform für Menschen und Betriebsmittel ermöglicht. Die Betriebsmittel werden im entworfenen Modell zudem in aktive und passive Betriebsmittel unterteilt. Die aktiven Betriebsmittel sind selbsthandelnd tätig, z.B. ein Roboter. Die passiven Betriebsmittel können nur durch ein aktives Betriebsmittel eingesetzt werden, z.B. einen Schrauber oder Maschinenelemente. Das Datenmodell umfasst zudem relative oder absolute Betriebsmittelorte. (siehe auch Reinhart et al. 2017)

|  |  |  |  |  |
|---|---|---|---|---|
| Robotischer Manipulator | Mobile Plattform | 3D-Kamera | Parallelgreifer | Vakuumgreifer |
| 27-38-01-01 Knickarmroboter | 27-38-01-90 Roboter (nicht spezifiziert) | 27-31-02-01 Kamera (Bildauswertung) | 36-12-34-01 Greifer (Lastaufnahme) | 36-12-34-01 Greifer (Vakuum- lasthaftgeräte) |
| 27-38-01 Roboter | | 27-31-02 Bildauswertung | 36-12-34 Lastaufnahmeeinrichtung, Lastanschlagmittel | |

|  |  |  |  |  |
|---|---|---|--|---|
| Lenkmotor | Sicherheits- laserscanner | X-Box-Controller | 2D-Laserscanner | Ultraschallsensor |
| 27-02-24-03 Schrittmotor | 27-27-27-05 Sicherheitsgerich- teter Laserscanner | 27-37-14-04 Steuerschalter, Joystick | 27-27-09-13 Laserscanner | 27-27-08-04 Ultraschall- abstandssensor |
| 27-02-24 Synchronmotor | 327-27-27 Sicherheitsgerichtete optoeel. Sensor | 27-37-14 Lastschalter, Steuerschalter | 27-27-09 Optoelektronischer Sensor | 27-27-08 Sensor für Abstand, Entfernung, Dicke |

Gruppe
 Klassifikationsklasse
 Name des Betriebsmittel

Abbildung 8: Klassifizierung ausgewählter Betriebsmittel innerhalb der eCI@ss (eCI@ss e.V. 2018) mit Fokus auf mobile Robotik (nach Wilde 2018)

Die Anforderungen an die Betriebsmittelbasisfunktionalitäten wurden im Rahmen des Kolloquiums „Kommunikationsarchitektur und Dienste“ in Zusammenarbeit mit TP 2 definiert. Als Middleware für die Robotersysteme wurde das Robot Operating System (ROS) ausgewählt. Abbildung 9 zeigt die Implementierung von Betriebsmittelbasisfähigkeiten in einem ROS-basierten Steuerrechner. Hier wird bereits das Konzept der Hardwareunabhängigkeit von Betriebsmitteln berücksichtigt, welches im folgenden Kapitel zu AP 1.3. im Detail vorgestellt wird. (siehe auch Reinhart et al. 2018)

Während des dritten Projektjahres wurden zwei Aspekte des AP 1.2 nochmals vertieft betrachtet. Zum einen wurde auf Empfehlung der Gutachter aus der zweiten Zwischenbegutachtung das Konzept zur Modellierung von menschlichen Teammitgliedern im Mensch-Roboter-Teamverbund nochmals aufgegriffen (siehe AP 1.2.1). Zum anderen wurde als Grundlage für die vertikale Vernetzung der Betriebsmittel mit dem PPS-System aus TP 3 über OPC UA ein Roboterinformationsmodell entworfen, das eine einheitliche Selbstbeschreibung dieser im digitalen Fabrik-Zwilling ermöglicht (siehe AP 1.2.2).

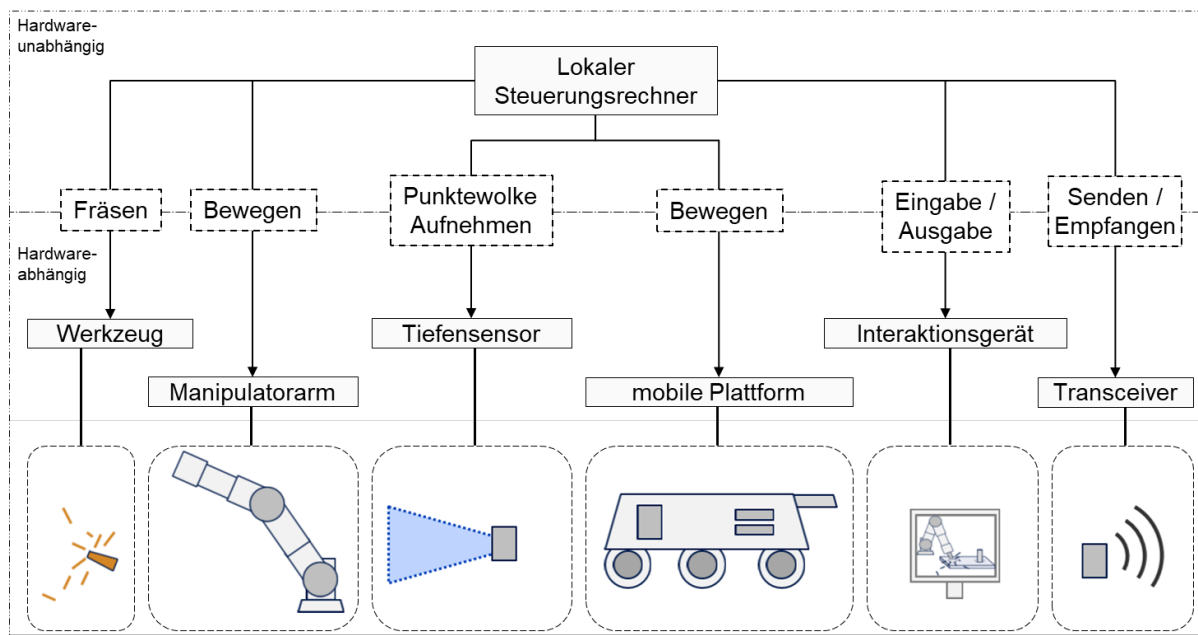


Abbildung 9 : Beispielhafte Darstellung von unterschiedlichen Betriebsmitteln einer mobilen Roboterplattform (entnommen aus Reinhart et al. 2017)

Arbeitspaket 1.2.1: Klassifizierung der Betriebsmittel

Im dritten Jahr wurde auf Gutachteranregung die Modellierung von menschlichen Teammitgliedern im Mensch-Roboter-Teamverbund tiefergehend untersucht. In diesem Zusammenhang wurde die kompetenzbasierte Beschreibung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter nach Korder et al. (2019) als vielversprechender Ansatz identifiziert. Die Klassifizierung durch Berufsgruppenzugehörigkeit (vgl. ISCO-08 nach International Labour Organization 2012) wird dabei zu einem Personen-spezifischen Kompetenzmodell erweitert. Die Dimensionen sind persönliche Kompetenzen, handlungs- und umsetzungsorientierte Kompetenzen, technisch-methodische Kompetenzen sowie sozial-kommunikative Kompetenzen. Die technisch-methodischen Kompetenzen sind nach der Taxonomie von Hammerstingl und Reinhart (2017) als montagebezogene Fähigkeiten modelliert. Damit besteht eine äquivalente Beschreibungsform für die Fähigkeiten von Roboter und Mensch (vgl. AP 1.3), welche eine gemeinsame Einplanung im PPS-System und Aktionsplanung von Mensch und Roboter ermöglicht (vgl. AP 1.4 und TP 3). Eine dynamische Kompetenz-basierte Personal-Einplanung über beispielsweise individuelle Informationssysteme für Werkkräfte wurde demonstriert (Korder et al. 2019) und stellt einen vielversprechenden Ansatz dar. Die Mensch-Maschine-Interaktion wird innerhalb von FORobotics schwerpunktmäßig in TP 4 und nicht in TP 1 betrachtet und wurde deshalb an dieser Stelle nicht weiter fokussiert.

Arbeitspaket 1.2.2: Definition der Beschreibungsform für Betriebsmittel

Zur Einplanung und Steuerung der Produktionsressourcen aus einem übergeordneten Produktionsplanungs- und -steuerungssystem (PPS-System), wie es in TP 3 entwickelt wird, bedarf es einer geeigneten Kommunikationsarchitektur zwischen den verteilten Systemen. Hierfür wurde während des letzten Projektjahres ein Ansatz auf Basis von OPC UA entwickelt. Jeder Roboter verfügt über einen OPC-UA-Server, über den er ein für sich individuelles Informationsmodell bereitstellt,

welches seinen Aufbau sowie seine Fähigkeiten beschreibt. Das übergeordnete Planungssystem fungiert als OPC-UA-Client und kann sich so mit allen im Netzwerk verfügbaren Robotern verbinden, deren Informationsmodelle erkunden und mit diesen kommunizieren. Die Basis für die Kommunikation über OPC UA bildet somit das zugrundeliegende Informationsmodell. Das innerhalb von FORobotics entwickelte Informationsmodell ist in Bochtler (2019) erläutert und wird im Folgenden auf dieser Basis zusammenfassend vorgestellt. Die Ausarbeitung erfolgte in Zusammenarbeit zwischen TP 1, TP 2 und TP 3 sowie den beiden Industriepartnern ITQ und Software Factory. Im ersten Schritt wurden die Anforderungen an das Informationsmodell zur Beschreibung der Ressourcen spezifiziert. Anschließend wurden auf Basis einer Literaturrecherche bestehende Informationsmodelle zur Beschreibung von Robotersystemen analysiert und hinsichtlich der gestellten Anforderungen bewertet. Als am besten geeignet für den in FORobotics betrachteten Anwendungsfall hat sich die OPC-UA-Companion-Spezifikation Robotik (VDMA 40010-1:2019) herausgestellt. Sie bildet daher die Basis für das hier vorgestellte Roboterinformationsmodell. Abbildung 10 zeigt eine Übersicht über das entwickelte Roboterinformationsmodell.

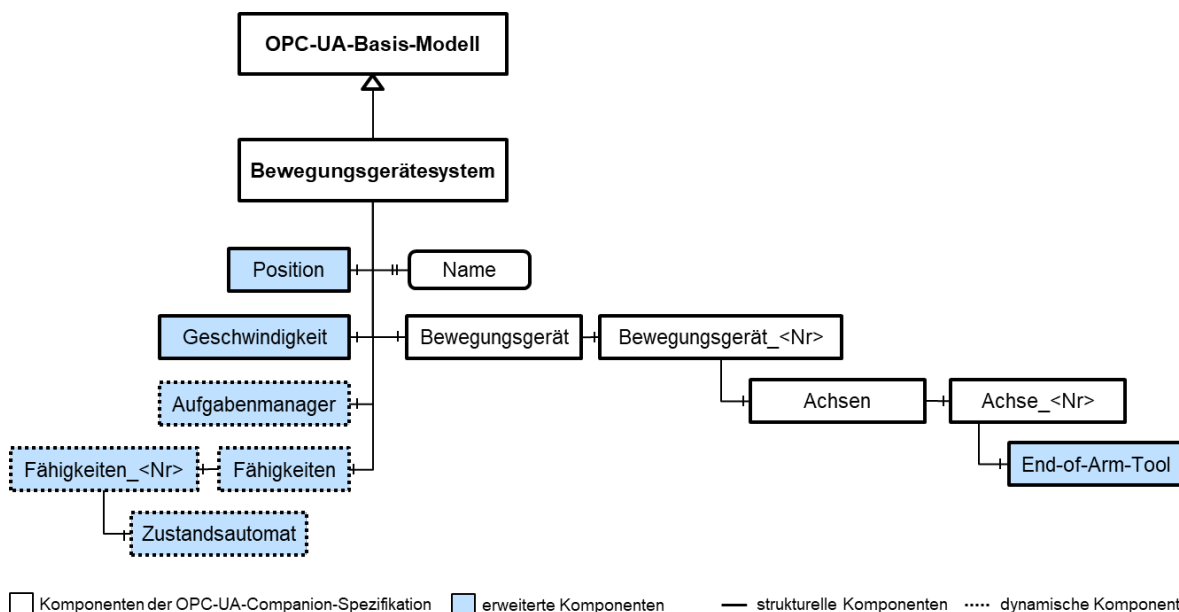


Abbildung 10: Überblick OPC-UA-Informationsmodell für die Beschreibung der Ressourcen (in Anlehnung an Bochtler 2019)

Das Roboterinformationsmodell nutzt das OPC-UA-Basis-Modell als Grundlage und baut weiter auf der OPC-UA-Companion-Spezifikation (VDMA 40010-1:2019) auf. Die Komponenten, die aus der OPC-UA-Companion-Spezifikation direkt übernommen wurden, sind in der Abbildung weiß hinterlegt, wohingegen die auf Basis des Metamodells erweiterten Komponenten blau eingefärbt sind. Weitere Komponenten der OPC-UA-Companion-Spezifikation ohne Relevanz für den Anwendungsfall in FORobotics wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen. Es ist zwischen strukturellen und dynamischen Komponenten zu unterscheiden. Die strukturellen Komponenten umfassen geometrische Komponenten und Relationen innerhalb des Roboterinformationsmodells. Die zugrundeliegenden Variablen können von einem OPC-UA-Client lediglich einge-

sehen, aber nicht verändert werden und eignen sich so maßgeblich zur Überwachung des Zustands des Roboters. Die dynamischen Komponenten bilden die Fähigkeiten des Roboters ab und ermöglichen die Modellierung von Aufgabensequenzen zur Übergabe an den Roboter. Von Seiten des OPC-UA-Clients können die zugrundeliegenden Variablen verändert und zugehörige Methoden aufgerufen und ausgeführt werden. Den Einstiegspunkt in das Informationsmodell stellt das Bewegungsgerätesystem dar. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten auf oberster Ebene zusammenfassend beschrieben:

- *Name*: Eindeutige Bezeichnung der Ressource durch den Entwickler oder Hersteller.
- *Bewegungsgerät*: Jedes für sich genommene funktionsfähige Roboterelement wird als ein Bewegungsgerät dargestellt. Untergeordnet werden weiter die einzelnen Achsen sowie der Endeffektor (End-of-Arm-Tool) des Roboters modelliert. In Summe kann so der Aufbau des Robotersystems ganzheitlich dargestellt werden.
- *Position & Geschwindigkeit*: Zur Modellierung mobiler Robotersysteme wurden dem Informationsmodell die beiden Komponenten Position und Geschwindigkeit hinzugefügt. Da durch diese beiden Variablen die Position und Geschwindigkeit des mobilen Robotersystems im Gesamten angegeben werden, sind diese direkt dem Bewegungsgerätesystem untergeordnet.
- *Fähigkeiten*: Innerhalb des Projekts FORobotics wird das Funktionsspektrum eines Roboters durch dessen Fähigkeiten widerspiegelt. Fähigkeiten werden durch einen eindeutigen Namen sowie Ein- und Ausgangsparameter spezifiziert (siehe zweiter Zwischenbericht AP 1.4.2). Weiter liegt jeder Fähigkeit ein Zustandsautomat, angelehnt an den PackML-Zustandsautomaten, zugrunde, der ihren Ausführungsstatus (z.B. Idle, Executing, Aborted, ...) angibt. Diese Information kann ebenso über das Informationsmodell eingesehen werden. Eine detaillierte Beschreibung dazu erfolgt unter AP 1.3.1 und AP 1.3.4.
- *Aufgabenmanager*: Der Aufgabenmanager ermöglicht die Übergabe von Jobs an den Roboter und bildet die Schnittstelle zum Aufgabenmanagement des Roboters (siehe AP 1.4.3). Jobs setzen sich aus einzelnen Teilaufgaben zusammen, die entweder sequenziell oder parallel durch den Roboter bearbeitet werden sollen. Über den Aufgabenmanager können dem Roboter so neue Jobs übergeben werden oder es kann der Ausführungsstatus des Jobs oder einzelner untergeordneter Teilaufgaben eingesehen werden. Auch ein Pausieren oder Abbrechen eines Jobs ist möglich.

Das Roboterinformationsmodell wurde innerhalb des zweiten und dritten Projektjahres implementiert und erlaubt die Beschreibung unterschiedlicher Robotersysteme in einer einheitlichen Darstellung. Dies wurde durch die Anwendung auf zwei unterschiedlichen simulierten Robotersystemen (Open Manipulator mit TurtleBot3 und KUKA Youbot, siehe auch TP D) validiert. (Bochtler 2019)

Arbeitspaket 1.3: Syntaktische und semantische Beschreibung von Diensten

Die Bearbeitung dieses Arbeitspakets erfolgte in allen drei Projektjahren. Einleitend werden die Ergebnisse der ersten beiden Projektjahre kurz zusammengefasst, für eine detaillierte Beschreibung ist auf die beiden entsprechenden Zwischenberichte (Reinhart et al. 2017, 2018) zu verweisen. Ziel dieses Arbeitspakets ist die Beschreibung der Fähigkeiten der Betriebsmittel in Form von Diensten und die Zurverfügungstellung der Dienste an den Teamverbund.

Für die Beschreibung der Betriebsmittelfähigkeiten als Dienste wurde ein hierarchischer Ansatz gewählt, der die Abstraktion und die Kapselung von Fähigkeiten erlaubt. So können auf Betriebsmittelebene Fähigkeiten gekapselt werden, welche für den Dienstaufruf nicht spezifisch nötig sind, z.B. Ansteuerung der Greiferschnittstelle wird gekapselt zu Greifen. Ebenso können Roboterfähigkeiten zur Reduktion der Komplexität auf Teamebene gekapselt werden, z.B. Navigieren, Manipulieren, Referenzieren und Greifen wird zu Kommissionieren gekapselt. (siehe auch Reinhart et al. 2017; Heuss et al. 2018)

Zur technischen Realisierung des Dienstaufbaus wurden Schnittstellen in einem Schichtmodell spezifiziert. Auf unterster Ebene wird durch die Einführung einer Hardware-Abstraktions-Ebene (Hardware-Abstraction-Layers, HAL) eine Hardware-unabhängige Ansteuerung der Betriebsmittel ermöglicht. In diesem Zusammenhang wurden Hardware-Abstraktions-Treiber (Hardware-Abstraction-Driver, HADs) spezifiziert, welche die Fähigkeiten von Betriebsmittelklassen entsprechend der o.g. Betriebsmittelklassifikation abstrahieren (siehe AP 1.2). Die HADs besitzen eine einheitliche Schnittstelle für den Zugriff durch die überlagerte Software. Somit ist es möglich, artgleiche Betriebsmittel unterschiedlicher Hersteller nach dem Plug&Play-Gedanken einheitlich anzusteuern. Die Kommunikation aus der Applikationsschicht mit der Treiberschicht erfolgt über die entkoppelte Prozesskommunikation von ROS und ist somit hardwareneutral. Auf den gleichen Weg können übergeordnete Dienste untergeordnete Dienste und Hardwaredienste lösungs- bzw. hardwareneutral kapseln. (siehe auch Reinhart et al. 2018; Wilde 2018; Heuss et al. 2018)

Die Fähigkeiten von Betriebsmitteln gleicher Klassen können sich in ihrer Ausprägung unterscheiden, beispielsweise die Traglast und die Reichweite unterschiedlicher Manipulatoren. Die für eine Fähigkeit relevanten Eigenschaften werden in der Betriebsmittelklasse definiert. Die Betriebsmittelfähigkeiten wurden somit um Eigenschaften erweitert, welche in einem Anforderungen-Fähigkeiten-Abgleich mit den Anforderungen auszuführender Prozesse verglichen werden können, z.B. Mindesttraglast oder Reichweitenbereich für die Manipulation. (siehe auch Reinhart et al. 2017)

Weiter können Betriebsmitteldienste nur aufgerufen werden, wenn sie dazu bereit sind, also z.B. nicht gerade anderweitig eingesetzt werden. Zur Erfassung des Betriebsmittelzustandes wird ein Zustandsautomat (State Machine) verwendet, welcher sich an der ANSI-ISA-88.00.01-2010 orientiert und von Hammerstingl und Reinhart (2017) erweitert wurde (siehe auch Reinhart et al. 2018). In Kooperation mit TP 2 wurde das Konzept weiter detailliert (vgl. AP 2.1.3 in TP 2).

Weiter wird zur Koordination der höherwertigen Roboterfähigkeiten über das interne Aufgabenmanagement des Roboters (siehe AP 1.4.3) sowie zur Ansteuerung und Überwachung des Roboters von dem übergeordneten PPS-System (siehe TP 3) eine einheitliche Beschreibung und Schnittstelle für die als Dienste angebotenen Fähigkeiten benötigt. Im dritten Projektjahr wurde deshalb die Beschreibungsform für Dienste (AP 1.3.1) und die Schnittstelle für den Dienstaufruf (AP 1.3.2 und AP 1.3.4) erweitert.

Arbeitspaket 1.3.1: Beschreibungsform für Dienste

Das Konzept zur Einbindung der Betriebsmittel in den Teamverbund der Fabrik wurde innerhalb des dritten Projektjahres weiter ausgearbeitet. Durch die Entwicklung eines OPC-UA-Servers mit einheitlichem Roboterinformationsmodell (siehe AP 1.2.2 und AP 1.4.1), der auf jeder Roboterplattform läuft, kann ein übergeordnetes PPS-System (siehe TP 3 und AP 3.4.2) mit Hilfe eines OPC-UA-Clients alle Roboter in einem Fabriknetzwerk finden und in die Planung und Steuerung einbeziehen. Die Nutzung von OPC UA bringt an dieser Stelle zwei wesentliche Vorteile: Die Anwendung der OPC-UA-Kommunikationsstruktur sieht die Abbildung von Datenbeziehungen und

Metadaten einzelner Datenobjekte vor und ermöglicht so eine semantische Interpretation der Datenobjekte. Das zugrundeliegende Roboterinformationsmodell wurde bereits in AP 1.2.2 vorgestellt. Die Anwendung des Informationsmodells auf Roboter-Seite sowie dessen Kenntnis auf PPS-Seite erlaubt eine einfache Erkundung der Informationen des Roboters (Aufbau, Fähigkeiten, Status, usw.) sowie zugleich eine einheitliche Ansteuerung und Übergabe von Aufgaben an den Roboter. In Summe kann so eine einfache und schnelle Integration neuer Betriebsmittel bzw. Roboter in den Teamverbund sichergestellt werden.

Arbeitspaket 1.3.2: Schnittstelle für den Dienstaufwurf

Innerhalb des Projekts FORobotics werden die Funktionalitäten des Roboters als dessen Fähigkeiten über mehrere Abstraktionsebenen hinweg modelliert und implementiert (siehe auch AP 1.4.2 in Reinhart et al. 2018). Um eine flexible Zusammenstellung der Fähigkeiten des Roboters sowie deren Aufruf in variabler Reihenfolge innerhalb unterschiedlicher Aufgabensequenzen zu ermöglichen, bedarf es einer einheitlichen Schnittstellenspezifikation für Fähigkeiten. Diese dient zum einen den Entwicklerinnen und Entwicklern der Fähigkeiten als Vorlage für die Erstellung neuer Fähigkeiten. Zum anderem kann so eine generische Ansteuerung aus übergeordneten Steuerungssystemen realisiert werden (siehe AP 1.4.3). Ein entsprechendes Konzept wurde in Zusammenarbeit mit TP 2 erarbeitet und von Heuss et al. (2019) und Dengler (2019) vorgestellt. Abbildung 11 stellt das Konzept in der Übersicht dar.

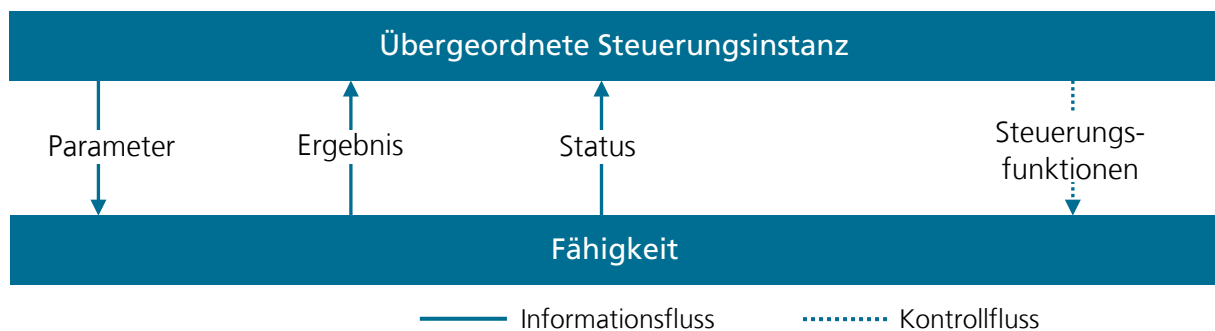


Abbildung 11: Schnittstellenspezifikation von Fähigkeiten (in Anlehnung an Dengler 2019)

Jede Fähigkeit stellt ein definiertes Set an Steuerungsfunktionen bereit. Diese dienen zum Starten, Stoppen, Zurücksetzen sowie Pausieren einer Fähigkeit durch eine übergeordnete Steuerungsinstanz. Dies ist entweder eine höherwertige zusammengesetzte Fähigkeit, das interne Aufgabenmanagement des Roboters oder ein Planungs- und Steuerungssystem, wie es in TP 3 entwickelt wurde. Weiter muss jede Fähigkeit die Parameter spezifizieren, welche sie zur Ausführung benötigt. Beispielsweise müssen einer Fähigkeit zur Navigation der mobilen Plattform die Zielkoordinaten übergeben werden. Andersherum kann es auch sein, dass eine Fähigkeit auf Basis von Sensordaten Informationen über ihr Umfeld bestimmt, z.B. die Position eines aufzunehmenden Objekts. Diese Informationen werden mittels der Ergebnisvariablen an die übergeordnete Steuerungsinstanz zurückgegeben. Über die Statusvariable übermitteln die Fähigkeiten zu jedem Zeitpunkt ihren aktuellen Ausführungsstatus.

Für die interne Steuerung und Überwachung der Abläufe einer Fähigkeit sowie zur Bereitstellung der standardisierten Steuerungsfunktionen eignen sich Zustandsautomaten. Auf Basis einer Literaturrecherche wurde das PackML Interface State Model der OMAC (Nøkleby 2016) als Grundlage ausgewählt und für den betrachteten Anwendungsfall in FORobotics angepasst (siehe Abbildung 12).

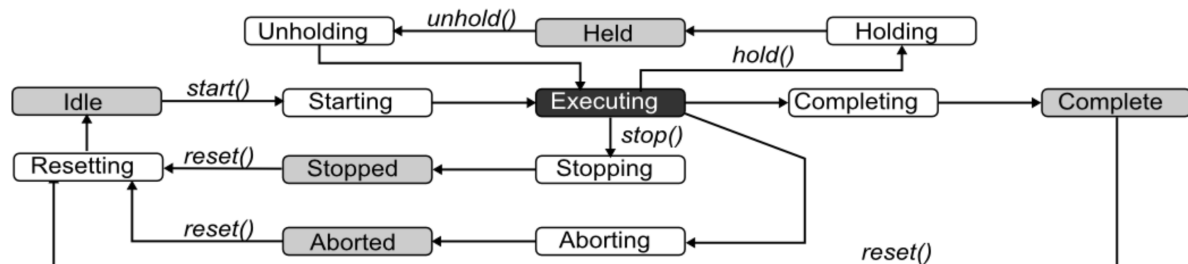


Abbildung 12: Zustandsautomat einer Fähigkeit in Anlehnung an das PackML Interface State Model (Ausschnitt entnommen aus Heuss et al. 2019)

Innerhalb des Zustandsautomaten werden die einzelnen Zustände, die eine Fähigkeit annehmen kann, beschrieben sowie die Zustandsübergänge zwischen diesen definiert. Hierbei unterscheidet das PackML Interface State Model zwischen ausführenden Zuständen (acting states, weiß hinterlegt) und wartenden Zuständen (waiting states, grau hinterlegt). Wartende Zustände sind stabile Zustände, während derer auf ein Signal von außen gewartet wird, um in den nachfolgenden Zustand zu wechseln. Die entsprechenden Kontrollfunktionen sind in Abbildung 12 kursiv gekennzeichnet und entsprechen den zuvor vorgestellten Steuerungsfunktionen. Innerhalb der ausführenden Zustände werden die durch den Anwender implementierten Routinen einer Fähigkeit bearbeitet. Der Übergang zu Folgezuständen wird durch interne Signale geregelt. Nur der Zustand „Executing“ ist wartender und ausführender Zustand zugleich. Der Status der Fähigkeit entspricht dem aktuellen Zustand innerhalb des Zustandsautomaten.

Der beschriebene Ansatz zur Implementierung und Steuerung von Fähigkeiten wurde in ein Template überführt, das einem Anwender zur Entwicklung neuer Fähigkeiten zur Verfügung steht. Hierbei muss die nutzende Person lediglich beschreiben, was innerhalb der ausführenden Zustände der Fähigkeit passieren soll. Im Anschluss kann die Fähigkeit entsprechend der zu Beginn vorgestellten Schnittstellenspezifikation angesteuert werden. Nutzung und Funktionalitäten des Template wurden zudem für eine einfache Anwendung in ein Wiki überführt. (Heuss et al. 2019; Dengler 2019)

Das entstandene Template für die Implementierung von Fähigkeiten findet in den Demonstratoren am *iwb* Anwendung und wurde dort zur Implementierung unterschiedlichster Fähigkeiten im Bereich der mobilen Manipulation auf drei unterschiedlichen Robotersystemen genutzt:

- Yaskawa HC 10 am *iwb*-Versuchstand (siehe Heuss und Reinhart 2020)
- OpenManipulator mit Turtlebot3 (siehe Heuss et al. 2019; Dengler 2019)
- KUKA Youbot (siehe Dengler 2019)

In Summe konnten so die zu Beginn spezifizierten Anforderungen hinsichtlich generischer Ansteuerung von Fähigkeiten erfüllt sowie die Einfachheit der Anwendung des Template durch unterschiedliche Personen validiert werden.

Arbeitspaket 1.3.4: Verfügbarkeit von Diensten

Zur Überprüfung der Verfügbarkeit von Fähigkeiten wurde eine allgemeingültige Abfrage auf Basis des PackML-Zustandsautomaten (Nøkleby 2016) entwickelt und implementiert. Das Konzept wurde bereits in AP 1.3.2 beschrieben. Die Statusvariable einer jeden Fähigkeit gibt Aufschluss über deren aktuellen Ausführungsstatus und folglich über die Verfügbarkeit. Durch eine Komposition der Fähigkeiten über mehrere Ebenen hinweg zur Bearbeitung komplexer Produktionsaufgaben wird der Ausführungsstatus zusammengefasst, sodass höherwertige zusammengesetzte Fähigkeiten von dem Ausführungsstatus der ihnen untergeordneten Fähigkeiten abhängen. Folglich entspricht der Bearbeitungsstatus der höchstgelegenen Aufgabe dem Verfügbarkeitsstatus der mobilen Roboterplattform. Der Verfügbarkeitsstatus der mobilen Plattform sowie ihres aktuellen Fähigkeiten-Sets können so an das übergeordnete PPS-System aus TP 3 kommuniziert werden und dienen als Grundlage für deren übergeordnete Einplanung aller Ressourcen im Fabrikverbund (siehe AP 3.4.2).

Arbeitspaket 1.4: Geschäftslogik zur Einbindung in den Teamverbund

Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes erfolgte im zweiten und dritten Projektjahr. Einleitend wird das Zusammenspiel der TPs 1 bis 3 erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse des zweiten Projektjahrs kurz zusammengefasst (vgl. Reinhart et al. 2018) und anschließend die Ergebnisse des dritten Jahres den Arbeitspaketen zugeordnet. Im Folgenden wird „Fähigkeit“ synonym zum bisherigen Terminus „Dienst“ verwendet.

Zur besseren Verständlichkeit von AP 1.4 wird vorab auf die Zusammenhänge zwischen den TPs 1 bis 3 eingegangen. Auf Basis der in TP 1 entwickelten Basisfunktionalitäten zur Ansteuerung der Betriebsmittel können höherwertige Funktionalitäten definiert werden, wie beispielsweise eine Navigation, Bahnplanung oder Greifpunktbestimmung. Die Entwicklung dieser Funktionalitäten ist maßgeblich TP 2 zuzuordnen. Damit auch diese Funktionalitäten im Produktionsbetrieb genutzt werden können, ist es nötig, diese als Fähigkeiten zu beschreiben. Die Entwicklung geeigneter Konzepte zur Modellierung und Beschreibung von Fähigkeiten ist ein Kernthema von TP 1. TP 2 baut hierauf auf, indem es das bereitgestellte Fähigkeiten-Modell nutzt; Fokus von TP 2 ist jedoch die Entwicklung der Algorithmen zur Realisierung der benötigten Funktionalitäten. Weiter wird innerhalb des Projekts ein aufgabenorientierter Ansatz für die Planung und Programmierung der Ressourcen angewandt (vgl. TP 3). Dies bedeutet, dass innerhalb der aufgabenorientierten Produktionsplanung ein Job soweit ausgeplant wird, dass der Roboter die resultierende Aufgabensequenz durch sein bereitgestelltes Fähigkeiten-Set ausführen kann. Eine entsprechende Modellhierarchie als Grundlage für das Matching zwischen durchzuführenden Aufgaben und durch den Roboter angebotenen Fähigkeiten wurde in Zusammenarbeit zwischen TP 1 und TP 3 entwickelt (vgl. AP 3.1.2 in Reinhart et al. 2018). Auf dieser Basis werden den einzelnen Ressourcen durch das Planungssystem aus TP 3 für sie ausführbare Jobs zugewiesen. Für die Abarbeitung der innerhalb eines Jobs spezifizierten Aufgaben durch den individuellen Roboter wird auf Roboterebene eine Form des Aufgabenmanagements benötigt. Dieses muss zum einen Jobs von der Produktionsplanung und -steuerung aus TP 3 entgegennehmen und zum anderen die bereitgestellten, in TP 1 und TP 2 implementierten, Fähigkeiten zielgerichtet aufrufen und deren Ausführung global überwachen. Die Ausarbeitung des Aufgabenmanagements zur Ansteuerung der Roboterfähigkeiten wird in TP 1 betrachtet (vgl. AP 1.4.3). Im Folgenden werden zuerst die Ergebnisse des zweiten Projektjahres zusammengefasst, gefolgt von einer Beschreibung der Ergebnisse des dritten Projektjahres, gegliedert nach den APs:

Im zweiten Projektjahr wurde eine Anwendersoftware entwickelt, um den vorgelagerten Inbetriebnahmeprozess einer mobilen Roboterplattform zu begleiten. Für die Komposition und Konfiguration der Betriebsmittel sind keine tieferen Kenntnisse über die Funktionsweise der HADs nötig. Über den GUI-Konfigurator (vgl. Wizard) werden Betriebsmittel ausgewählt, über mechanische und informationstechnische Schnittstellen gekoppelt und ggf. mit Betriebsmittelparametern konfiguriert. Schließlich erzeugt die Anwendersoftware ein lauffähiges Softwaresystem für den mobilen Roboter. Die GUI basiert auf Tkinter, HADs sind in einer SQLite-Datenbank hinterlegt und die Software wird mittels der Container-Management-Software Docker als portable Pakete erzeugt (Neuburger 2017).

In Zusammenarbeit mit den TPs 2 und 3 wurde im zweiten Projektjahr ein Beschreibungsmodell für Aufgaben und Fähigkeiten entwickelt, welches im dritten Projektjahr innerhalb der APs 1.4.2 und 3.1.2 weiterentwickelt und angewandt wurde. Die Modellierung der Roboter-Fähigkeiten, welche im Fokus von TP 1 steht, erfolgt hierbei semantisch analog zu dem in TP 3 genutzten Aufgaben-Modell. Dies ermöglicht innerhalb der Produktionsplanung in TP 3 eine automatisierte Zuweisung und Ausplanung von Aufgaben für einzelne Betriebsmittel.

Weiter wurde im zweiten Projektjahr die Entwicklung eines Aufgabenmanagements auf Roboter-ebene begonnen, welches Dienstanfragen in Form eines Jobs (Aufgabensequenz) an den mobilen Roboter entgegennimmt, die Bearbeitung des Jobs durch einen zielgerichteten Aufruf der implementierten Fähigkeiten koordiniert sowie Statusrückmeldungen an die höhergelegenen Planungs- und Steuerungsebenen gibt. Der Fähigkeitsaufruf im ROS-System wurde mittels einer Action-Server-Client-Architektur realisiert (vgl. Prozesskommunikation in AP 1.3).

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden im dritten Projektjahr die Fähigkeiten der Roboterplattformen zur Realisierung der innerhalb von FORobotics betrachteten Use Cases weiter spezifiziert und entsprechend der Schnittstellenspezifikation aus AP 1.3 implementiert (siehe AP 1.4.2). Weiter wurde das Aufgabenmanagement auf Roboterebene weiter ausgearbeitet, implementiert und anhand des Use Cases zur Motor-Montage validiert (siehe AP 1.4.3). Für eine flexible Ad-hoc-Kommunikation zwischen den mobilen Roboterplattformen sowie dem PPS-System aus TP 3 wird eine automatisierte Einbindung der Akteure in das Kommunikationsnetzwerk der Fabrik benötigt. Auf Ebene des Roboters wurde hierzu eine Methodik zur automatisierten Konfiguration des über OPC UA bereitgestellten Roboterinformationsmodells in Abhängigkeit von Aufbau und Funktionsweise eines individuellen Roboters entwickelt (siehe AP 1.4.1). Aufgrund der logischen Zusammenhänge zwischen den Unterarbeitspaketen in AP 1.4 werden diese für einen besseren Lesefluss in der Reihenfolge AP 1.4.2, AP 1.4.3 und AP 1.4.1 vorgestellt.

Arbeitspaket 1.4.2: Dienste höherer Ordnung

Innerhalb des Forschungsprojekts FORobotics werden die Funktionalitäten der Betriebsmittel als Fähigkeiten abgebildet. In Heuss et al. (2018) und darauf aufbauend in Heuss et al. (2019) wurde ein Modell zur Beschreibung von Fähigkeiten vorgestellt. Auf Basis dieses Modells wurden innerhalb des dritten Projektjahres die Fähigkeiten zur Realisierung des Anwendungsfalls zur Kommissionierung und Montage der Motoren beschrieben und implementiert. Der implementierte Anwendungsfall wurde zusammenfassend von Heuss und Reinhart (2020) vorgestellt. Im Folgenden werden auf dieser Basis die Ergebnisse beschrieben:

Das Modell zur Beschreibung der Fähigkeiten umfasst Aggregation und Polymorphismus. So kann zwischen elementaren und zusammengesetzten Fähigkeiten unterschieden werden, wobei die

zusammengesetzten aus elementaren oder untergeordneten zusammengesetzten Fähigkeiten bestehen und elementare Fähigkeiten nicht weiter unterteilbar sind (z.B. durch Betriebsmittelbindung). Weiter wird zwischen abstrakten und spezifischen Fähigkeiten unterschieden. Auf abstrakter Ebene werden Fähigkeiten lösungsneutral beschrieben. Spezifische Fähigkeiten leiten sich aus den abstrakten Fähigkeiten ab und beziehen im Gegensatz zu diesen die Ausprägung der Fähigkeit mit ein, beispielsweise in Form der Kinematik oder des Wirkprinzips. Tabelle 1 zeigt dies anhand von zwei Beispielen, wie sie in dem Anwendungsfall auftreten.

Tabelle 2: Beschreibung der Fähigkeiten anhand der Modellhierarchie

| | Abstrakt | Spezifisch |
|-----------------|-----------|--|
| Elementar | Sichern | Kraftgeregeltes Sichern, positionsgeregeltes Sichern |
| Zusammengesetzt | Aufnehmen | Aufnehmen eines Motors, Aufnehmen einer Schäferkiste |

Die Fähigkeit „Sichern“ beschreibt auf abstrakter Ebene den Vorgang des Schließens eines Greifers zum Sichern eines Objekts. Auf spezifischer Ebene ist jedoch zu unterscheiden, ob dieser positions- oder kraftgeregelt auszuführen ist. „Sichern“ stellt eine elementare Fähigkeit dar, die nicht weiter zerlegt wird. Dahingegen ist „Aufnehmen“ eine zusammengesetzte Fähigkeit. Durch die Kombination der elementaren Fähigkeiten „Sichern“ und „Bewegen“ wird der komplexe Vorgang des Aufnehmens von Objekten realisiert. Tatsächlich implementiert werden somit immer spezifische elementare oder zusammengesetzte Fähigkeiten, wohingegen abstrakte Fähigkeiten als Metamodell dieser zu verstehen sind. (Heuss et al. 2018; Heuss et al. 2019)

Für den Anwendungsfall der Kommissionierung und Montage von Motoren werden für den Manipulator auf oberster Ebene die in Abbildung 13 dargestellten zusammengesetzten Fähigkeiten benötigt. Mit Hilfe dieser zusammengesetzten Fähigkeiten können die Motoren aus dem Regal aufgenommen werden, in das Rundloch der Motorhalterung auf dem sogenannten Bauchladen eingesetzt, von dort wiederaufgenommen und in den Montagering gefügt werden. Die zusammengesetzten Fähigkeiten auf oberster Ebene setzen sich wiederum aus untergeordneten zusammengesetzten Fähigkeiten sowie einer gemeinsamen Menge elementarer Fähigkeiten zum Bewegen, Sichern, Messen der Pose, usw. zusammen. Dies ist in Abbildung 13 vereinfacht am Beispiel des Aufnehmens eines Motors aus dem Regal dargestellt.

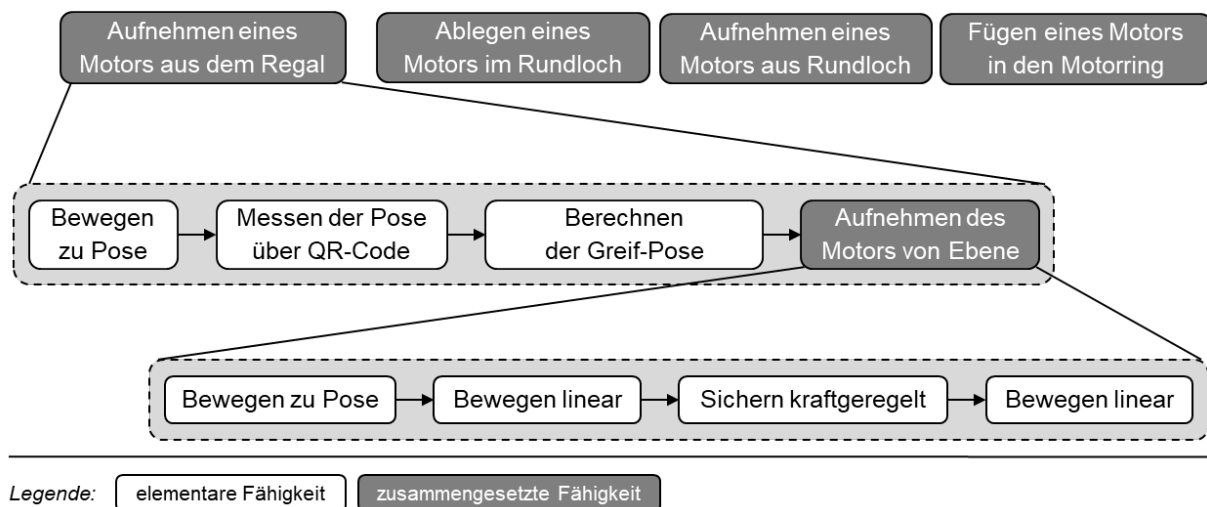


Abbildung 13: Notwendige Fähigkeiten des Manipulators für den Anwendungsfall Motormontage

Die dargestellten Fähigkeiten wurden innerhalb des letzten Jahres beschrieben und entsprechend implementiert (Knoll 2019). Abbildung 14 zeigt einen beispielhaften Ablauf zur Abbildung des Use Case in vereinfachter Form am Teildemonstrator des *iwb*. Im Regal wird Kamera-basiert ein Motor lokalisiert und durch den Roboter entnommen. Anschließend wird dieser in den Montagering gefügt.



Abbildung 14: Aufnehmen eines Motors aus dem Regal und Fügen des Motors in den Montagering

Durch eine flexible Kombination sowie Parametrisierung der Fähigkeiten auf Ebene des Aufgabenmanagements können so die unterschiedlichen zu bewerkstelligen Aufgaben innerhalb des Anwendungsfalls bewältigt werden (siehe AP 1.4.3). Der realisierte Anwendungsfall wurde auch von Heuss und Reinhart (2020) ohne Detaillierung der implementierten Fähigkeiten als Anwendungsbeispiel für autonome Industrieroboter veröffentlicht. Für eine detaillierte Vorstellung der am *iwb* entstandenen Demonstratoren sei zudem auf TP D verwiesen.

Arbeitspaket 1.4.3 Aufgabenmanagement auf Roboterebene

Im zweiten Zwischenbericht wurde ein erstes Konzept zur Realisierung eines Aufgabenmanagements auf Roboterebene vorgestellt. Dieses wurde innerhalb des dritten Jahres in Zusammenarbeit mit TP 2 weiter ausgearbeitet sowie implementiert. Die entstandenen Ergebnisse sind in Heuss et

al. (2019) beschrieben und werden auf dieser Basis im Folgenden zusammenfassend vorgestellt. Abbildung 15 zeigt das entstandene Software-Framework in der Übersicht.

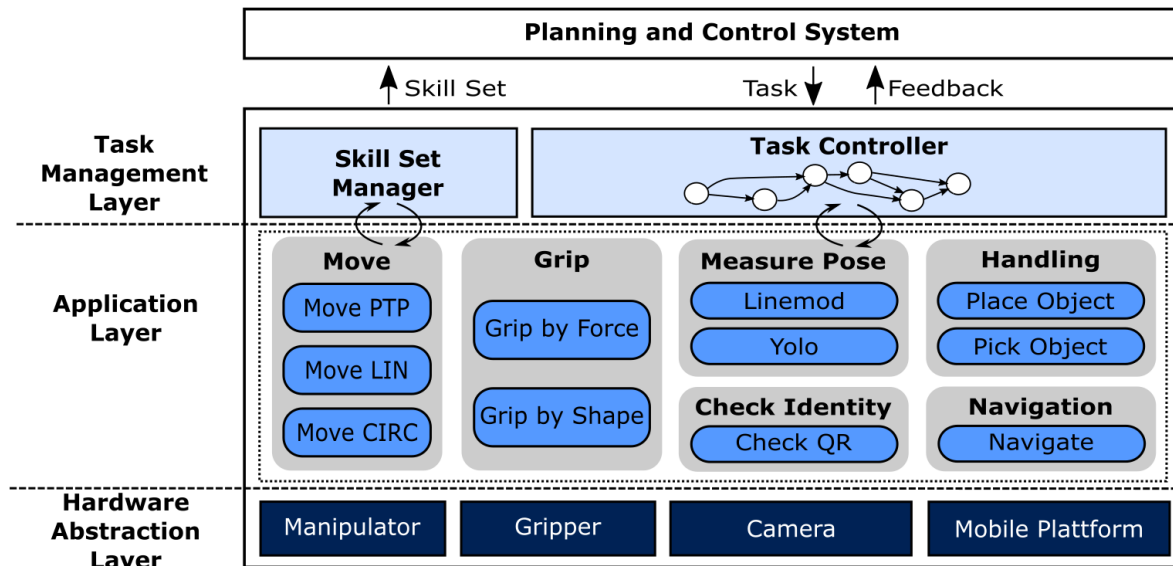


Abbildung 15: Überblick über das Aufgabenmanagement auf Roboterebene (Heuss et al. 2019)

Für das Software-Framework wurde ein dreischichtiger Aufbau gewählt. Motivation und zugrundeliegende Kriterien für die Unterteilung der drei Ebenen wurden bereits ausführlich in Reinhart et al. (2017, 2018) erläutert. Innerhalb des untersten „Hardware Abstraction Layer“ werden die Hardwarekomponenten mit dem Ziel der Hardwareabstraktion eingebunden. Der mittlere „Application Layer“ stellt die Funktionalitäten des Roboters zur Bearbeitung vielfältiger Produktionsaufgaben in Form von Fähigkeiten bereit. Diese werden thematisch in sogenannte Apps gegliedert. Je nach Aufgabengebiet kann der Roboter mit unterschiedlichen Apps und somit Fähigkeiten ausgestattet werden. Der oberste „Task Management Layer“ übernimmt übergeordnet die Koordination der an den Roboter übergebenen Jobs. Aufbau und Funktionsweise werden im Folgenden im Detail erklärt:

Beim Start eines Robotersystems registrieren sich alle Fähigkeiten beim Fähigkeiten-Set-Manager (engl.: Skill-Set Manager), sodass diesem zu jedem Zeitpunkt eine vollständige Auflistung aller Fähigkeiten des Roboters bekannt ist. Diese Liste wird an das übergeordnete PPS-System (engl.: Planning and Control System) aus TP 3 kommuniziert. Durch eine semantisch korrelierende Beschreibung von verfügbaren Fähigkeiten und durchzuführenden Aufgaben erfolgt die Zuweisung passender Aufgaben zu einem Roboter. Mehrere Teilaufgaben werden zu einem Job zusammengefasst. Ein beispielhafter Job ist die Kommissionierung von Kisten mit unterschiedlichem Inhalt aus einem Lager und die Bereitstellung dieser für eine Werkkraft an den Arbeitsplatz. Dieser Job wird an den Roboter übergeben. Die zielgerichtete Abarbeitung des übergebenen Jobs durch den Aufruf der dafür notwendigen Fähigkeiten erfolgt durch den Aufgabencontroller (engl.: Task Controller) des Roboters und ist in Abbildung 16 dargestellt.

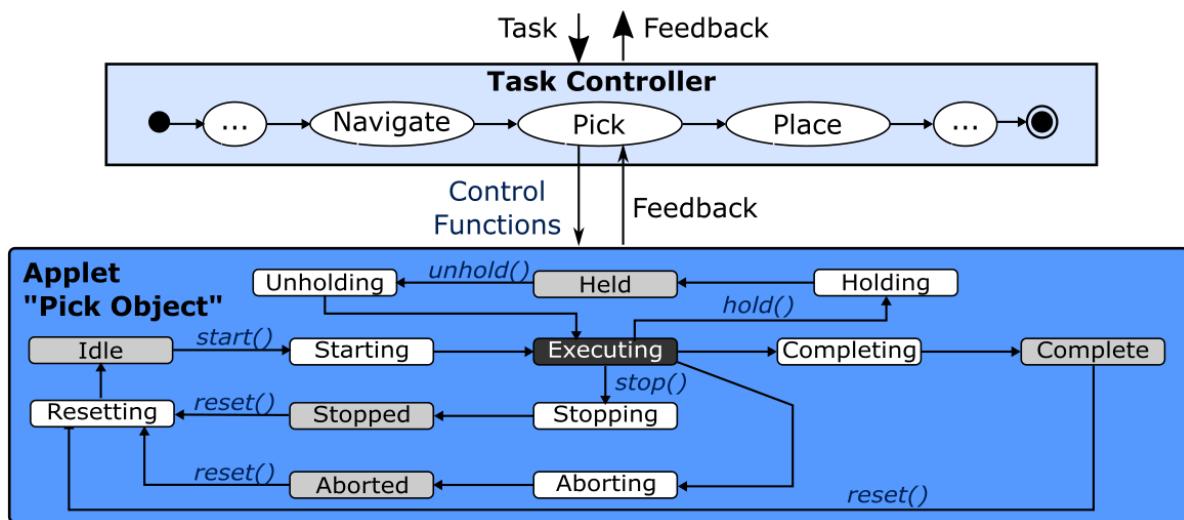


Abbildung 16: Funktionsweise des Aufgabencontroller (Heuss et al. 2019)

Die an den Roboter übergebenen Jobs setzen sich aus einer Abfolge von sequentiellen sowie parallelen Aufgaben zusammen, die als hierarchische finite Zustandsautomaten modelliert werden. Nach Eingang eines neuen Jobs erstellt der Aufgabencontroller automatisch zur Laufzeit den zugehörigen Zustandsautomaten, bestehend aus den einzelnen Teilaufgaben. Anschließend wird dieser durchlaufen und in jedem Zustand die zugehörige Fähigkeit zur Bearbeitung der Teilaufgabe aufgerufen. Hierbei wird auf die standardisierten Steuerungsfunktionen (engl.: Control Functions), wie bei AP 1.3.2 vorgestellt, zurückgegriffen. Durch die einheitliche Schnittstellenbeschreibung für Fähigkeiten ist es dem Aufgabencontroller an dieser Stelle möglich, Jobs in generischer Art und Weise unabhängig ihres Aufbaus sowie untergeordneter Teilaufgaben zu bearbeiten. Andersherum kann der Aufgabencontroller ohne Anpassungsbedarf auf jedem Roboter – unabhängig seiner Fähigkeiten – eingesetzt werden, solange dieser die in AP 1.3.2 vorgestellte Schnittstellenspezifikation implementieren. Zusätzlich gibt der Aufgabencontroller kontinuierlich Statusrückmeldungen an das übergeordnete PPS-System aus TP 3, sodass im Falle von Verzögerungen in der Aufgabenbearbeitung oder bei fehlerhaftem Verhalten zielgerichtet reagiert werden kann. (Heuss et al. 2019)

Das vorgestellte Softwareframework wurde am *iwb* auf drei unterschiedlichen Demonstratoren erfolgreich implementiert und getestet:

- Yaskawa HC 10 am *iwb*-Versuchstand (siehe Heuss und Reinhart 2020)
- OpenManipulator mit Turtlebot3 (siehe Heuss et al. 2019; Dengler 2019)
- KUKA Youbot (siehe Dengler 2019)

Die zu Beginn des zweiten Projektjahres spezifizierten Anforderungen an ein Aufgabenmanagement auf Roboterebene wurden damit erfüllt.

Arbeitspaket 1.4.1: Einbindung von Betriebsmitteln

Auf Grundlage des entwickelten Ansatzes zum Aufgabenmanagement auf Roboterebene (siehe AP 1.4.3) wurde innerhalb dieses APs ein erweitertes Konzept für die Kommunikation zwischen

einzelnen Robotern und einem übergeordneten PPS-System entwickelt. Der Ansatz ist in Zusammenarbeit zwischen TP 1, TP 2 und TP 3 sowie den Industriepartnern ITQ und Software Factory entstanden. Für die Kommunikation zwischen Roboter und PPS-System wurde bereits im ersten Projektjahr OPC UA ausgewählt. Auf Roboterebene wird deshalb ein OPC-UA-Server benötigt, mit welchem sich im Anschluss das PPS-System als OPC-UA-Client verbinden kann. Da innerhalb des Projekts FORobotics das PPS-System unter Zuhilfenahme der IoT-Plattform Thingworx entwickelt wurde, wurde in diesem AP ein allgemeingültiger Ansatz für die schnelle und einfache Integration des digitalen Zwillings von Roboterplattformen unterschiedlichen Aufbaus in eine IoT-Plattform postuliert. Die entstandenen Ergebnisse sind in Bochtler (2019) beschrieben und werden auf dieser Basis beziehungsweise zum FORobotics-Gesamtprojekt vorgestellt:

Der Roboter stellt über einen OPC-UA-Server zum einen eine Selbstbeschreibung in Form eines digitalen Zwillings bereit. Zum anderen empfängt er darüber neue Jobbeschreibungen und kommuniziert den aktuellen Ausführungsstatus. Das zugrundeliegende Informationsmodell wurde bereits innerhalb der Beschreibung von AP 1.2.2 vorgestellt. Innerhalb dieses APs wird das Konzept zur automatischen Konfiguration und Erstellung des OPC-UA-Servers in Abhängigkeit vom tatsächlichen Aufbau und Fähigkeiten-Set des Roboters erläutert. Abbildung 17 gibt einen schematischen Überblick über das entwickelte Package für die OPC-UA-Kommunikation auf Roboterebene.

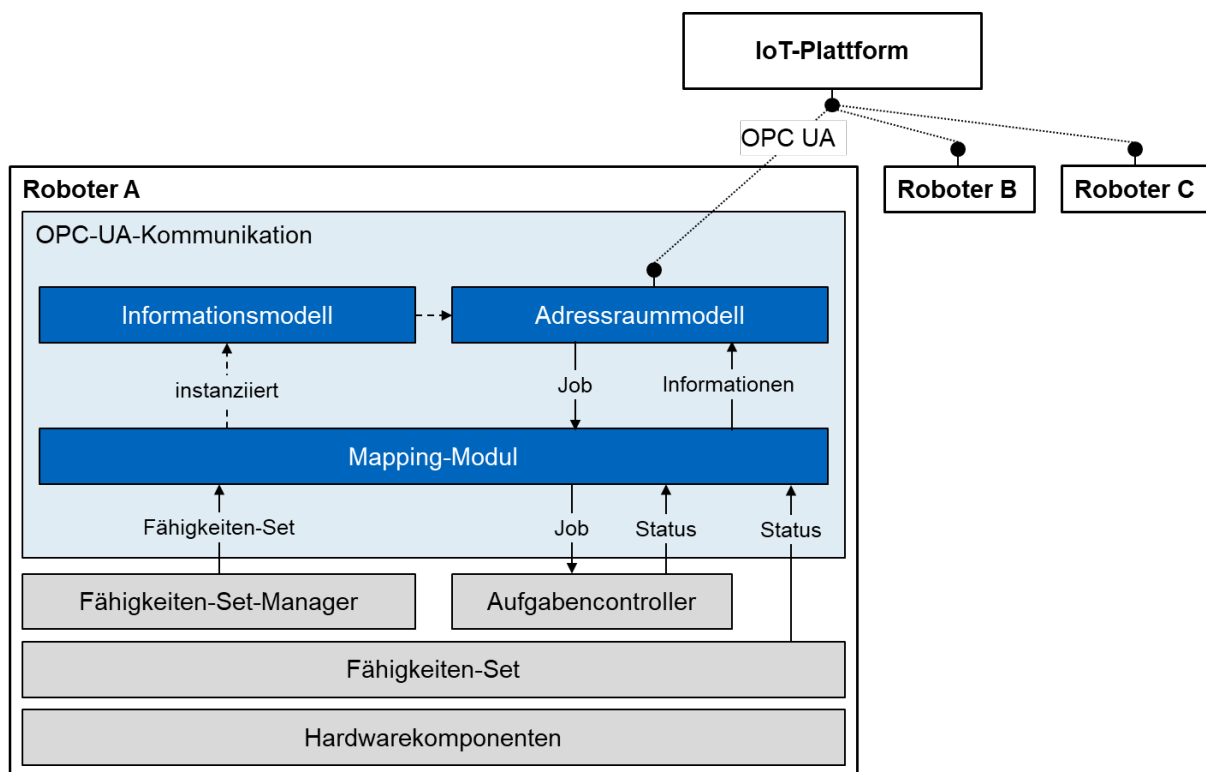


Abbildung 17: Schematische und vereinfachte Darstellung des Package für die OPC-UA-Kommunikation (in Anlehnung an Bochtler 2019)

Auf dem Roboter wird als Betriebssystem ROS eingesetzt. Das Mapping-Modul dient als Schnittstelle zwischen dem ROS-System und dem OPC-UA-Server. Das Mapping-Modul instanziiert den OPC-UA-Server innerhalb des ROS-Systems. Hierbei wird für den vorliegenden Roboter innerhalb

des Adressraummodells eine spezifische Instanz des Informationsmodells erstellt. Dies bedeutet, dass ein konsistentes Mapping zwischen den Topics und Services des ROS-Systems und den einzelnen Modellelementen im OPC-UA-Informationsmodell hergestellt wird. Die Basis hierfür bildet eine Konfigurationsdatei, die jeder Roboter bereitstellt. Auf diese Weise können beispielsweise im Anschluss Jobs über OPC UA an den Aufgabencontroller übergeben werden oder einzelne Fähigkeiten sowie der Aufgabencontroller selbst können ihren Status über OPC UA an höhergelegene Entitäten kommunizieren. Das Package zur Kommunikation mittels OPC UA wurde als Erweiterung zum Aufgabenmanagement implementiert und kann flexibel auf jedem Roboter eingesetzt werden, der das vorgestellte Framework nutzt. Eine einfache Erweiterung der Informationen, die der Roboter über sich mittels des OPC-UA-Servers bereitstellt, ist möglich. Das vorgestellte Konzept wurde auf zwei unterschiedlichen Robotern (OpenManipulator mit Turtlebot3 und KUKA Youbot) in der Simulationsumgebung Gazebo validiert. Der Aufbau des OPC-UA-Client und die einfache Integration des digitalen Zwillings des Roboters in die IoT-Plattform werden im Bericht zu TP 3 beschrieben. (Bochtler 2019)

4.1.4 Kooperation mit anderen Teilprojekten

Gemeinsam mit anderen Teilprojekten wurden übergreifende Themen im Bereich der hierarchischen Planungs- und Kommunikationsarchitektur (TP 2, TP 3), der Arbeitssystemanalyse für die Use Cases (TP 5) und der Use-Case-bezogenen Konzipierung des Demonstrators (TP D) bearbeitet. Im Folgenden wird die Kooperation weiter detailliert:

Kooperation mit TP 2 und 3

Innerhalb des Forschungsprojekts wurde ein aufgabenorientierter Ansatz zur Planung und Programmierung der Ressourcen gewählt. Hierbei ist eine ganzheitliche Sichtweise von der Produktionsplanung und -steuerung bis hin zur Feldebene entscheidend. Aus diesem Grund fand in regelmäßigen Abständen ein enger Austausch mit TP 2 und TP 3 statt. Die Zusammenarbeit bezog sich hierbei maßgeblich auf folgende Themen:

- Klassifizierung der Betriebsmittel und Entwicklung eines Modells zur Modellierung von Ressourcen
- Entwicklung der Modellhierarchie zur Beschreibung von Aufgaben und Fähigkeiten
- Konzeption der ROS-Architektur des Roboters
- Analyse der Anwendungsfälle und Ableitung der benötigten Fähigkeiten zur Ausführung von Aufgaben im Bereich Kommissionierung, Montage und Mensch-Maschine-Interaktion
- Implementierung von Fähigkeiten zur Realisierung benötigter Funktionalitäten
- Zusammenspiel zwischen Aufgabenmanagement auf Roboter- und PPS-Ebene
- Kommunikations- und Verarbeitungsarchitektur sowie Datenaustausch zwischen den Systemen über OPC UA

Kooperation mit TP 5

Die Veröffentlichung Leichtmann et al. (2018) entstand in enger Zusammenarbeit mit TP 5. Grundlage dieser Veröffentlichung waren die Ergebnisse der Arbeitssystemanalyse, die ebenfalls mit TP 5 durchgeführt wurde. Im Rahmen eines Expertenworkshops wurden die Ergebnisse der Arbeitssystemanalyse diskutiert und verallgemeinert, sodass diese auf dem Frühjahrskongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA) präsentiert werden konnten.

Kooperation mit TP D

Innerhalb des Teilprojekts D werden die Erkenntnisse aus den einzelnen TPs zum Aufbau eines gemeinsamen Demonstrators genutzt. Über die Projektlaufzeit hinweg fand hierzu ein regelmäßiger Austausch zwischen TP 1, TP D und allen weiteren TPs statt. Innerhalb von TP 1 wurde schwerpunktmäßig an den folgenden Teildemonstratoren mitgewirkt:

- Demonstrator für die dynamische Pfadplanung mobiler Roboterplattformen am iwb
- Demonstrator für Sichtlagerkistenkommissionierung am iwb
- Demonstrator zur Motorkommissionierung und Motormontage am iwb
- Demonstrator zur dynamischen Weltmodellierung für mehrere mobile Roboter bei ITQ
- Demonstrator zur Mensch-Roboter-Interaktion bei MAN
- Virtueller Demonstrator in Gazebo, bestehend aus OpenManipulator mit Turtlebot 3 und KUKA Youbot
- Gesamtdemonstrator des FORobotics-Forschungsverbund am TZA in Augsburg

4.1.5 Veröffentlichungen

Im Rahmen dieses Teilprojekts sind folgende Veröffentlichungen entstanden:

- Leichtmann, B.; Schnös, F.; Rinck, P.; Zäh, M. F.: Work system analysis for the user-centered development of cooperative mobile robots. GfA- Frühjahrskongress. (2018)
- Heuss, L.; Lux-Gruenberg, G.; Hammerstingl, V.; Schnös, F.; Rinck, P.; Reinhart, G.; Zäh, M. F.: Autonome mobile Roboter in der Smart Factory – Dynamische Planung und Adaption mobiler Roboter für die flexible Produktion. Wt Werkstattstechnik online **108** (2018) 9, S. 574-579.
- Heuss, L.; Roder, S.: Mobile ad-hoc kooperierende Roboterteams in der Fabrik der Zukunft. Handling (2018)
- Heuss, L.; Blank, A.; Dengler, S.; Zikeli, G. L.; Reinhart, G.; Franke, J. (2019): Modular Robot Software Framework for the Intelligent and Flexible Composition of Its Skills. In: Ameri, F.; Steck, K. E.; Cieminski, G.; Kiritsis, D. (Hrsg.): Advances in production management systems. Production management for the factory of the future. Austin, USA, 1-5.9.2019. Cham, Schweiz: Springer Nature 2019, S. 248-256. ISBN: 978-3-030-29999-6.
- Heuss, L.; Reinhart, G.: Integration of Autonomous Task Planning into Reconfigurable Skill-Based Industrial Robots. 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vienna, Austria, 2020, S. 1293-1296.
- Rinck, P.; Blank, A.; Zäh, M.; Franke, J. (2017). Forschungsvorhaben FORobotics: Mobile Roboterplattformen: Ein neues Team in der Fabrik. Handling, 12/2017, S. 30-31. Online unter https://www.industrial-production.de/epaper-handling/HJ1217/index.html#page_30 [letzter Zugriff am 26.4.2021]
- Zäh, M. F.; Rinck, P.; Blank, A.; Schnös, F.: FORobotics: Mehr erreichen im Team. Handling. (2017)

4.1.6 Literaturverzeichnis

Baldauf, Moritz (2019): Entwicklung einer Methodik zur Identifizierung und Bewertung von Anwendungsfällen zur Mensch-Roboter-Interaktion in der Produktion. Masterarbeit. Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

ANSI-ISA-88.00.01-2010 (2010). Batch control part 1 : models and terminology.

VDI-Richtlinie 2815 Blatt 1, 1978: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung – Einführung, Grundlagen.

Bochtler, Maximilian (2019): Flexible Integration und Nutzung von Robotersystemen in einer IoT-Plattform. Semesterarbeit. Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

Dengler, Sebastian (2019): Konzeption eines modularen Softwareframeworks zur aufgabenorientierten Steuerung autonomer mobiler Roboter. Masterarbeit. Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

eCl@ss e.V. (Hg.) (2018): ECLASS-Whitepaper. Mit Daten und Semantik auf dem Weg zur Industrie 4.0. eCl@ss e.V. Online verfügbar unter https://www.eclass.eu/static/documents/wiki/Whitepaper/ecl-Whitepaper-Industrie40_DE.pdf, zuletzt geprüft am 22.10.2020.

Hammerstingl, Veit; Reinhart, Gunther (2017): Fähigkeiten in der Montage. Online verfügbar unter <http://mediatum.ub.tum.de/?id=1370174>, zuletzt geprüft am 01.07.2017.

Heuss, Lisa; Blank, Andreas; Dengler, Sebastian; Zikeli, Georg Lukas; Reinhart, Gunther; Franke, Jörg (2019): Modular Robot Software Framework for the Intelligent and Flexible Composition of Its Skills. In: Farhad Ameri, Kathryn E. Stecke, Gregor von Cieminski und Dimitris Kiritsis (Hg.): Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future, Bd. 566. Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 248–256.

Heuss, Lisa; Lux-Gruenberg, Gregor; Hammerstingl, Veit; Schnös, Florian; Rinck, Philipp; Reinhart, Gunther; Zäh, Michael (2018): Mobile Autonome Roboter in der Smart Factory: Dynamische Planung und Adaption mobiler Roboter für die flexible Produktion. In: wt Werkstattstechnik online 108 (9).

Heuss, Lisa; Reinhart, Gunther (2020): Integration of Autonomous Task Planning into Reconfigurable Skill-Based Industrial Robots. In: 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Vienna, Austria: IEEE, S. 1293–1296.

International Labour Organization (2012): Structure, group definitions and correspondence tables (International standard classification of occupations (ISCO-08), Volume 1). Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=471696>, zuletzt geprüft am 22.10.2020.

Knoll, Kevin (2019): Integration von Roboter-Skills für Lokalisierung und Bewegungsplanung in eine Skill-basierte Roboterarchitektur am Anwendungsfall der Kommissionierung. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

Korder, Svenja; Tropschuh, Barbara; Reinhart, Gunther (2019): A Competence-Based Description of Employees in Reconfigurable Manufacturing Systems. In: Farhad Ameri, Kathryn E. Stecke, Gregor von Cieminski und Dimitris Kiritsis (Hg.): Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future, Bd. 566. Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 257–264.

Lehnert, Pascal (2017): Ontologie-basierte Methode zur Erzeugung von Digitalen Zwillingen für mobile Roboterplattformen in dienstbasierten, flexiblen Produktionsumgebungen. Masterarbeit.

Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

Leichtmann, Benedikt; Schnös, Florian; Rinck, Philipp; Zäh, Michael; Nitsch, Verena (2018): Work system analysis for the user-centered development of cooperative mobile robots. In: Arbeit(s).Wissen.Schaf(f)t Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung (64. GfA-Frühjahrskongress).

Neuburger, Nicolas (2017): Entwicklung einer Anwendersoftware zur unabhängigen Hardwarekonfiguration von mobilen Robotern. Semesterarbeit. Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

Nøkleby, Carsten (2016): PackML Unit/Machine Implementation Guide. Organization for Machine and Automation Control (OMAC). Online verfügbar unter http://omac.org/wp-content/uploads/2016/11/PackML_Unit_Machine_Implementation_Guide-V1-00.pdf, zuletzt geprüft am 20.10.2020.

VDMA 40010-1:2019, 2019-07: OPC UA Companion Specification für Robotik (OPC Robotik) - Teil 1: Vertikale Integration. Online verfügbar unter <https://opcua.vdma.org/catalog-detail/-/catalog/1720a>.

Reinhart, Gunther; Henrich, Dominik; Berg, Julia (Hg.) (2017): 1. Zwischenbericht. FORobotics - Mobile, ad-hoc kooperierende Roboterteams.

Reinhart, Gunther; Henrich, Dominik; Berg, Julia (Hg.) (2018): 2. Zwischenbericht. FORobotics - Mobile, ad-hoc kooperierende Roboterteams.

Wilde, Andreas (2018): Implementation of hardware independent drives in mobile, autonomous robotics. Masterarbeit. Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

4.2 TEILPROJEKT 2 - UMFELDERKENNUNG, ABSICHERUNG UND LOCALE BAHNPLANUNG

Andreas Blank, Markus Hiller, Lisa Heuss, Sebastian Roder, Prof. Jörn Thielecke, Prof. Jörg Franke

4.2.1 Allgemeine Angaben

Beteiligte Industriepartner:

- Framatome GmbH (vormals Areva GmbH)
- Bertrandt
- Grenzebach GmbH
- ITQ GmbH
- Mayser GmbH & Co. KG
- Metrilus GmbH
- Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG
- PTM Mechatronics GmbH
- Roboception GmbH
- SALT Solution AG
- Siemens Gerätewerk Erlangen (GWE)
- Teamware GmbH

Projektleitung:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

4.2.2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Das vorliegende Teilprojekt 2 adressierte im Forschungsprojekt die autonomen Fähigkeiten der eingesetzten mobilen Roboter und Manipulatoren sowie die hierfür erforderliche sensorische Wahrnehmung, Sensordatenfusion, Interpretation der Sensordaten und die Umweltmodellierung. Ebenso war es Ziel des Teilprojekts die notwendige lokale Bewegungsplanung der mobilen Plattform und der integrierten Knickarmroboter bereitzustellen. Im Rahmen des Teilprojekts sollten zudem Absicherungskonzepte entwickelt, evaluiert und in den Gesamtdemonstrator integriert werden. Auch adressierte das Teilprojekt Forschungsfragen zur geeigneten Vernetzung der Betriebsmittel. Bezüglich des Use Case und des FORobotics Gesamtdemonstrators sollten in enger Zusammenarbeit mit dem Demonstrator-Teilprojekt TP D, die folgenden Use-Case-relevanten Fähigkeiten erschlossen und bereitgestellt werden:

- die sensorische Wahrnehmung der Plattformumgebung sowie die Umfelderkennung und -Modellierung auf Basis einer möglichst optimalen Sensorkonfiguration,
- das zweckmäßige Bewegen der Plattformen und Roboter des Demonstrators für den Transport, zur Handhabung und Montage von Komponenten sowie allgemein zur Aufgabenerfüllung,
- die Absicherung der Roboter entlang der verschiedenen Use-Case-Szenarien sowie
- die Entwicklung und Ausgestaltung der Kommunikation zwischen den Entitäten.

Den Gutachternvorschlägen der initialen Begutachtung folgend, erfolgte im ersten Projektjahr eine Umbenennung sowie Schwerpunktverlagerung des Teilprojekts 2 von „Vernetzung“ hin zur „Umfeldererkennung, Absicherung und lokalen Bahnplanung“ der mobilen Plattform. Der bestehende Forschungsbedarf wurde innerhalb von sechs Arbeitspaketen (AP) von unterschiedlichen Forschungspartnern erarbeitet.

Diese sechs APs zur Erreichung der Ziele gliedern sich dabei wie folgt:

- AP 1 adressierte Untersuchungen hinsichtlich der Vernetzung der Ressourcen des Shopfloors untereinander sowie zu Leitsystemen (iwb / TUM und FAU / LS FAPS).
- AP 2 und AP 3 fokussierten die Umfelderkennung, Sensordatenverarbeitung und -fusion, Lokalisierung, Menschklassifikation im Umfeld der Plattform sowie die Plattformabsicherung (FAU / LS FAPS & FAU / LS LIKE).
- AP 4 betrachtete Herausforderungen zur Trajektorienplanung der Plattformmanipulatoren und zum Greifen von Komponenten (u. a. beim Kommissionieren, zur fahrbegleitenden Vormontage sowie bei Mensch-Roboter-Teamaufgaben) (FAU / LS FAPS und iwb / TUM)
- AP 5 und AP 6 untersuchten und erschlossen Herausforderungen zur lokalen Bahnplanung der eingesetzten Manipulatoren, der mobilen Plattformen sowie der komplementären lokalen Bewegungsplanung von Plattform und Manipulator (FAU / LS LIKE und iwb / TUM).

Die Begutachtungen des ersten und zweiten Projektjahres mit jeweils sehr gutem Ergebnis schlugen eine Konzentration der Forschungsinhalte auf den im Verbund adressierten Use Case vor (siehe Beschreibung Teilprojekt TP D). Diese Änderungen führten insbesondere zu Konsequenzen für das AP 1, sowohl bezüglich des Inhalts als auch bezüglich des Zeitplans. AP 1 wurde daher gegenüber der ursprünglichen Planung bereits im Rahmen des zweiten Projektjahres abgeschlossen. Die so gewonnenen Kapazitäten sollten auf die Use-Case-nahen Zielsetzungen der Arbeitspakete AP 2 sowie AP 4 bis AP 6 konzentriert werden, wodurch Ziele wie das Kommissionieren, das Bin Picking oder die fahrbegleitende Vormontage intensiver adressiert werden sollten. Ebenso wurden von den Gutachtern gewünschte zusätzliche Inhalte zur Absicherung innerhalb des AP 2 auch über das erste Projektjahr hinaus betrachtet. Zielstellung des Teilprojekts war fortan eine möglichst am Gesamtdemonstrator sowie am Use Case orientierte Forschung und Entwicklung von Fähigkeiten.

4.2.3 Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss

Folgend werden die Forschungsprojektergebnisse von 2017 bis 2020 beschrieben. Die bereits in den vorangegangenen Berichten festgehaltenen Ergebnisse werden dabei in zusammengefasster Form beschrieben. Die zuletzt erfolgten Forschungsarbeiten werden ausführlicher dargelegt.

Ein großer Teil der Forschungsarbeiten des Teilprojekts erfolgte an den Standorten Erlangen bzw. Tennenlohe und München. Da es trotz der thematischen Nähe des TP zur Plattform bis zuletzt aus unterschiedlichen Gründen nicht möglich war ein Forschungsfunktionsmuster der mobilen Plattform MR-HC10 an diesen Standorten bereitzustellen, wurden nachfolgend beschriebene Untersuchungen überwiegend an separaten Einzeldemonstratoren bestehend aus konventionellen Knickarmrobotern und fahrerlosen Transportsystemen (FTS) durchgeführt. Hieraus resultierte ein signifikanter Mehraufwand für das TP, sowohl aufgrund fortwährender technischer Übertragungen zwischen verschiedenartigen Systemen als auch bzgl. Reisezeiten. Insbesondere ab dem dritten Projektjahr wurden monatliche bzw. seit 2020 zweiwöchentliche Integrations-, Testing- und Bewertungstage am Gesamtdemonstrator in Augsburg durchgeführt. Die Beschreibung der beforschten Einzeldemonstratoren erfolgt innerhalb des Teilprojekts TP D.

Arbeitspaket 2.1: Dienstbasierte Kommunikation und Fähigkeitenabgleich auf Betriebsmittelebene

Das AP 2.1 fokussierte die übergreifende Kommunikations- und Verarbeitungsarchitektur im Forschungsverbund. Dieses AP wurde wesentlich in den ersten beiden Projektjahren bearbeitet. Im dritten Projektjahr wurden die Ergebnisse auf den Gesamtdemonstrator übertragen. Die Bearbeitung der Forschungsfragen zur Kommunikation und Vernetzung wurde forschungsseitig von iwb / TUM sowie vom LS FAPS der FAU gemeinsam mit Industriepartnern durchgeführt.

Zur Realisierung einer ad-hoc-Kommunikationsstruktur zwischen den unterschiedlichen Akteuren in einer Fabrik bedarf es eines einheitlichen Kommunikationsprotokolls. Hierfür wurde innerhalb des ersten Projektjahres OPC UA auf Grund seiner vielen Vorteile ausgewählt. Jede Ressource stellt über OPC UA eine Selbstbeschreibung in Form eines digitalen Zwillings bereit. Durch die Sammlung der einzelnen, über die Middleware angebotenen Entitäten entsteht so in Summe der digitale Zwilling der Fabrik. Die unterschiedlichen Akteure der Fabrik stellen ihre Funktionalitäten als Fähigkeiten bereit. Über Komposition sowie Kombination der individuellen Fähigkeiten der Akteure können so in Summe komplexe Produktionsaufgaben ausgeführt werden. Hierzu wurde im ersten Projektjahr zum einen ein Konzept für eine hierarchische Koordinationsstruktur zur Ausführung von Aufgaben entwickelt (siehe linke Seite in Abbildung 18). Zum anderen wurde ein erstes Konzept für die ROS-Architektur des Roboters erarbeitet, welches auf Basis übermittelter Aufgaben die dynamische Fähigkeitenenerweiterung sowie deren Ausführung in Form eines Zustandsautomaten vorsieht (siehe rechte Seite in Abbildung 18). Für die Kommunikation über OPC UA wurde außerdem eine OPC UA Schnittstelle für ROS-Systeme entwickelt. Teile dieser Schnittstelle wurden durch die entstandene und betreute Arbeit (Förg 2017) evaluiert.

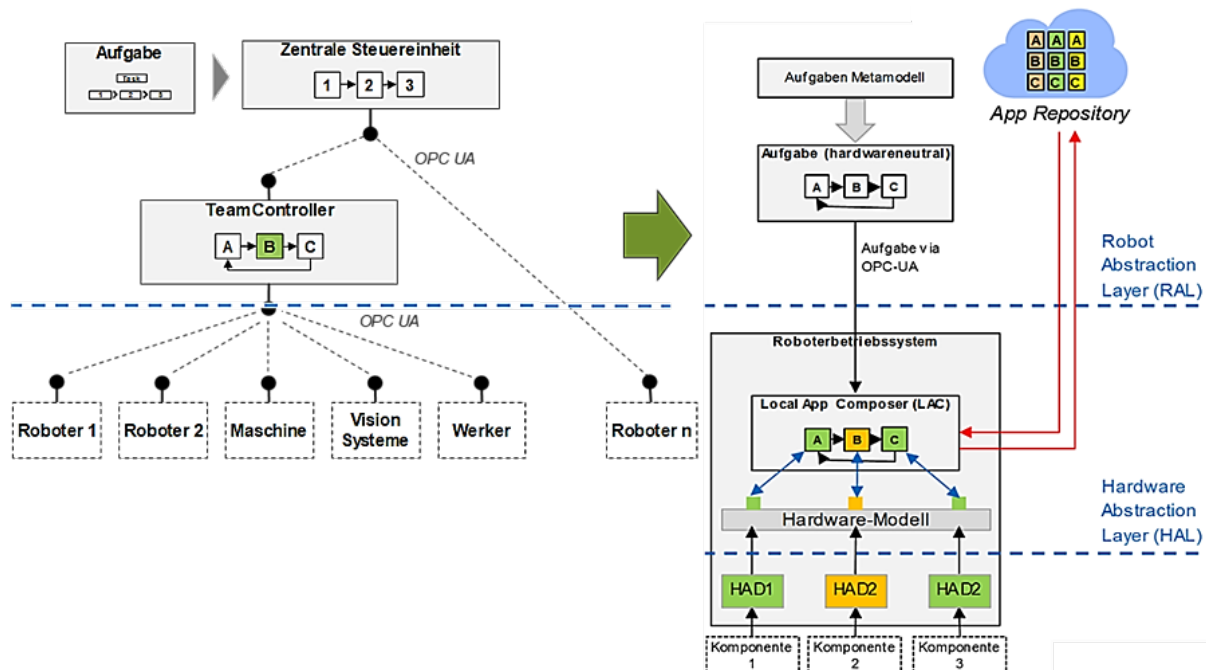


Abbildung 18: Hierarchische Koordinationsstruktur zur Ausführung von Aufgaben (links) und erstes Konzept für die ROS-Architektur der mobilen Roboterplattformen (rechts)

Innerhalb des zweiten Projektjahres wurde in Zusammenarbeit mit TP 1 und TP D die System-Architektur der mobilen Robotersysteme weiter ausgearbeitet und erweitert. Hierzu wurde zum einen die Kommunikationsarchitektur für die einzelnen Systemkomponenten der im Rahmen des Projekts aufgebauten Roboterplattformen spezifiziert und ein geeignetes Sicherheitskonzept diskutiert. Zum anderen wurde in Zusammenarbeit mit TP 1 die auf der rechten Seite der Abbildung 18 zu sehende Roboterarchitektur zu einer drei-schichtigen ROS-Architektur für mobile Roboterplattformen inkl. Aufgabenmanagement erweitert und in Heuss et al. (2018) und darauf aufbauend in Heuss et al. (2019) veröffentlicht. In TP 2 lag hierbei der Fokus auf dem modularen Gesamtaufbau der Roboterarchitektur mit dem Ziel die Roboterfähigkeiten in Abhängigkeit des Einsatzgebiets des Roboters einfach und dynamisch konfigurieren zu können sowie der Implementierung von Roboterfähigkeiten für die Navigation, das maschinelle Sehen und der Manipulation unterschiedlicher Objekte. In TP 1 wurde dahingegen schwerpunktmäßig die Modellierung und Beschreibung von Fähigkeiten sowie das übergeordnete Aufgaben-Management betrachtet (vgl. AP 1.4 von diesem Bericht und dem zweiten Zwischenbericht). Mobile Roboter sollen zukünftig variabel vielfältige Produktionsaufgaben übernehmen. Dies führt dazu, dass nicht das gesamte hierfür benötigte Wissen vorab auf dem Roboter installiert werden kann. Aus diesem Grund wurde ein Konzept entwickelt, in dem die Fähigkeiten des Roboters in einzelne Softwaremodule gekapselt werden. Angelehnt an den Consumer-Bereich werden diese als Apps bezeichnet. In Summe konnte so eine modulare Software-Architektur realisiert werden, die eine individuelle Konfiguration des Funktionsspektrums des Roboters in Abhängigkeit seines Einsatzgebiets erlaubt. Dies ist beispielhaft in Abbildung 19 dargestellt.

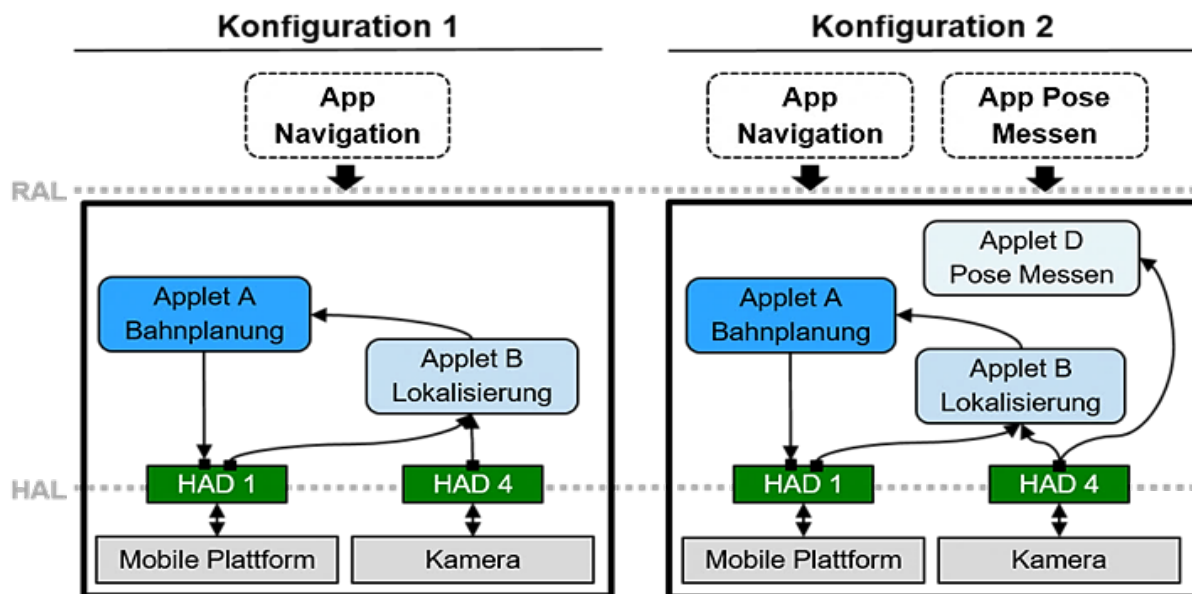


Abbildung 19: Beispielhafte Konfigurationen einer mobilen Roboterplattform (angelehnt an Heuss et al. 2018)

Die Bereitstellung der Funktionalitäten des Roboters als Fähigkeiten und die anwendungsspezifische Kapselung dieser in Apps wurde im Rahmen der Umsetzung des Bin-Pickings von Maschinenelementen weiter untersucht. Hierzu wurde für jede Fähigkeit ein Action-Server implementiert. SMACH erlaubt hierbei die Programmierung von finiten Zustandsautomaten auf einfache Art und

Weise und wurde deshalb zur Modellierung komplexer Roboterfähigkeiten auf Anwendungsebene eingesetzt und evaluiert. Einzelne Aspekte der ausgeführten Umsetzung und Evaluierung hinsichtlich SMACH und Zustandsautomaten wurden durch die am Lehrstuhl FAPS entstandene und betreute studentische Arbeit (Zikeli 2018; Frank 2019) unterstützt.

Die Ergebnisse des AP sind im Detail in den Zwischenberichten der vorangegangenen Projektjahre dokumentiert und finden Verwendung bei den Umsetzungen im Forschungsverbund, insbesondere für die Kommunikation und Vernetzung des Gesamtdemonstrators.

Arbeitspaket 2.2: Semantische Sensordatenanalyse zur Mensch- und Umfelderkennung

Ziel dieses AP waren Untersuchungen hinsichtlich einer robusten und möglichst vollständigen Detektion des Menschen, die Erkennung unerwarteter Entitäten und aufgabenbezogener Objekte im Produktionsumfeld sowie deren Bewegungsprädiktion. Weiterhin sollten die erkannten Objekte mit zusätzlichen semantischen Informationen (bspw. Beständigkeit oder Intention) angereichert werden, wobei zudem eine Bewertung der Plausibilitätswahrscheinlichkeit erfolgte. Darüber hinaus stand die Plattform-Absicherung im Fokus der Untersuchungen.

Dazu band das vorliegende AP eine Auswahl an Sensoren in die Kommunikations- und Verarbeitungsarchitektur (AP 2.1) der mobilen Robotersysteme ein, fusionierte geeignete Sensorpaarungen, gewann mittels verschiedener Algorithmen Informationen aus den erfassten Daten und stellte diese nachgelagerten Verarbeitungsschritten zur Verfügung.

Während dieses AP Inhalte zur Mensch- und Objekterkennung in der Plattformumgebung adressierte, wurden erforderliche Forschungsinhalte bzgl. Bin-Picking, fahrtbegleitender Handhabung und Montage von Objekten innerhalb des AP 2.4 betrachtet.

Arbeitspaket 2.2.1: Bewertung zur Verfügung gestellter Sensordaten

Die in diesem AP durchgeführten Untersuchungen adressierten die Eignung von Sensoren sowie die durch diese akquirierbaren Daten. Zusammenfassend können die durchgeführten Arbeiten bezüglich des Einsatzgebietes der Sensoren in die folgenden Fokus-Bereiche gegliedert werden: Umgebungserfassung, Plattform-Absicherung und Navigation.

Einzelne Aspekte der folgend dargelegten Forschungsergebnisse des Folgeabschnittes wurden durch die am Lehrstuhl FAPS entstandenen und betreuten studentischen Arbeiten (Lieret 2017; Schneider 2018; Hummel 2018; Endres 2018; Geisler 2018; Leser 2019) sowie durch die am Lehrstuhl LIKE entstandenen und betreuten studentischen Arbeiten (Hofmann 2018; Prossel 2018; Pfeuffer 2018; Kharboutli 2018; Fichtner 2019) unterstützt.

Es erfolgte eine eingehende Untersuchung der Ideal- sowie Realdaten der jeweiligen Sensoren sowie eine stochastische Charakterisierung und Bewertung deren inhärenter Fehler. Für die Umgebungserfassung näher in Betracht gezogen und hinsichtlich prinzipieller Eignung bewertet wurden folgende Systeme: 2D-RGB Kameras (u. a. Logitech C270 und IDS uEye), 3D-Kameras nach dem TOF-Prinzip (Microsoft Kinect v2), 3D-Kameras mit aktiver und passiver Stereovision (Intel RealSense R200, Orbbec Astra Pro, ZED, Roboception rc_visard), LIDAR-Sensoren (RPLidar A1, Sick Tim571), die robotereigenen Encoder bzw. Drehgeber und Kraft-Momenten-Sensoren, Ultraschallsensoren (Mayser USi und HC-SR04) sowie PIR-Sensoren (ST-ZV390-ZX) zur Detektion von Wärmequellen. Ebenso zur Plattformabsicherung im Nahbereich wurden Funktionsmuster der

Firma Mayser als kapazitive Kappen am Manipulator untersucht. Zur Extraktion von navigationsrelevanten Informationen wie Absolut- und Relativbewegung der Plattform wurden die Laserscanner als auch Odometriesensoren (Fusion von Raddrehgebern und IMU) betrachtet.

Die ausführlichen Ergebnisse zur Sensorbeurteilung und zur optimalen Sensorkonfiguration sind insbesondere dem Zwischenbericht des ersten Projektjahres sowie ergänzend des zweiten Projektjahres zu entnehmen. Zusammenfassend wird an der mobilen Plattform folgend dargelegte Sensorkonfiguration zur Umfelderkennung sowie zur Absicherung als zielführend befunden.

Zur Umfelderkennung wurden zunächst für mittlere bis große Entfernungen 2D-LIDAR Sensoren an Front und Heck der Plattform installiert. Diese sind in der Lage, das Umfeld zu überwachen und Objekte schnell und zuverlässig zu detektieren. Durch den hohen Erfassungsbereich bei nahezu gleichbleibender Genauigkeit eignen sich diese zur Lokalisierung der mobilen Plattform sowie zur genauen Lokalisierung erfasster Objekte im Umfeld.

Zur Bestimmung der exakten Position von Objekten im Roboterumfeld, zur Klassifikation und deren Verfolgung bieten sich aufgrund der höherdimensionalen Umfeld-Abdeckung (im Vergleich zu 2D-LIDAR) und den vergleichsweise niedrigen Kosten (im vgl. zu 3D-LIDAR) 3D-Kameras an. Diese stellen neben einer 3D-Punktwolke der Umgebung zudem auch Farbinformationen bereit. Während 3D-Kameras auf dem Prinzip aktiver Stereokameras sich insbesondere für texturlose, metallische Komponenten (z. B. beim Bin-Picking) eignen, werden Kameras auf dem ToF-Prinzip (z. B. KinectV2) für mit hoher Framerate bereitgestellter Punktwolken eingesetzt (60 Hz). Letztere sind für das Augmented Reality Teleoperationssystem des TP 4 von Relevanz.

Während bei Kameras des Typs KinectV2 signifikante Defizite bei der Tiefenbilderfassung metallischer Oberflächen bestehen, eignet sich hier die roboception rc_visard65 als Stereokamera mit zusätzlichem RandomDot-Projektor aufgrund ihrer hohen Genauigkeit und der hohen Punktwolkendichte als besonders geeignet für das Bin-Picking solcher Objekte. Nachteilhaft für die echtzeitnahe Umgebungsmodellierung ist allerdings die geringere Framerate des Tiefendatenstroms. Während diese Framerate für Bin-Picking als vollkommen ausreichend zu erachten ist. Aus den dargelegten Gründen wurden an der Plattform sowohl eine rc_visard65 als mitgeführte Kamera am Manipulator für Objekterkennungszwecke sowie eine auf den Plattformrücken gerichtete KinectV2 Kamera als stationäre Umgebungskamera für eine schnelle Punktwolkenerzeugung installiert. Ebenso wird die KinectV2 aufgrund derer eingebetteter Mensch- und Gliedmaßenerkennung sowie den Trackingfähigkeiten derselben für die Erkennung von Gesten und der Haltung des Menschen (siehe Teilprojekt TP 4) verwendet. Eine weitere rc_visard160 wird als Front-Umgebungskamera der mobilen Plattform eingesetzt. Diese dient der Klassifikation und Lokalisierung der Umgebung im nahen bis mittleren Entfernungsbereich.

Durchgeführte Untersuchungen zum Einsatz von RADAR am Beispiel eines WALABOT Sensors (UWB, 6.3 – 8 GHz) haben gezeigt, dass eine Menschklassifikation nur anhand der Amplitude des Echosignals aufgrund der zahlreichen Einflüsse von Umgebung, Aspektwinkel und Radarsystem nicht sicher erfolgen kann. Die Störquellen können in der Produktionsumgebung in Form von Objekten unterschiedlicher Materialien und Größe sowie der großflächigen Verwendung von Metall bei Maschinen und Gebäuden auftreten. Somit können Störgrößen wie Clutter oder die Mehrwegeausbreitung auftreten. Letztendlich wird vom Einsatz von RADAR in diesem Frequenzbereich zur Mensch- und Objekterkennung an der mobilen Plattform abgesehen.

Absicherung der mobilen Plattform innerhalb verschiedenartiger Use Case Szenarien

Einen im Laufe des Projektes aufkommenden und von den Industriepartnern als wichtig befundenen Schwerpunkt stellt die Absicherung des mobilen Roboters dar. Ein Ergebnis des TP's ist das in den Gesamtdemonstrator eingeflossene Absicherungskonzept (siehe Abbildung 21).

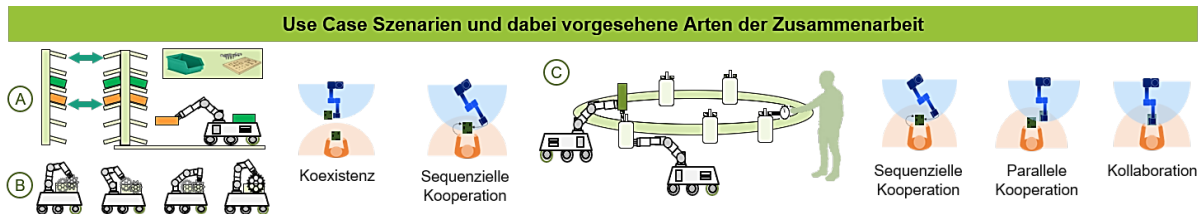


Abbildung 20: Im Use Case vorgesehene Arten der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter in Abhängigkeit des jeweiligen FORobotics Use Case Abschnitts (A) bis (C).

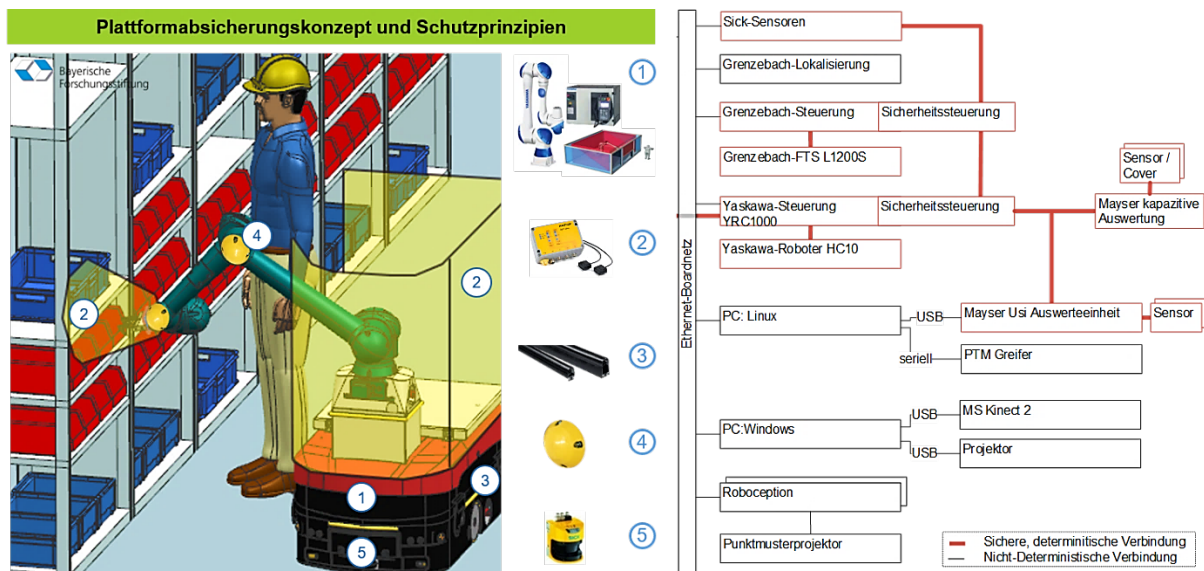


Abbildung 21: Plattformabsicherungskonzept und sensorisch eingesetzte Schutzprinzipien schematisch (links); Architektur zur Anbindung und Vernetzung der unterschiedlichen sicheren sowie nicht-sicheren Sensoren (rechts).

Abbildung 20 skizziert die vorgesehenen Arten der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter des Use Case innerhalb der einzelnen Szenarien. Letztere sind das Kommissionieren im Regalbereich (A), die fahrtbegleitende Vormontage und das fahrtbegleitende Bestücken (B) sowie die Mensch-Roboter-Teammontage von Elektromotoren (C). Für die Szenarien (A) und (B) wird von Koexistenz bis hin zur sequenziellen Kooperation ausgegangen. Die Bewertung von (C) ergab eine Zusammenarbeit bis hin zur Mensch-Roboter-Kollaboration.

Das entwickelte und auf das Funktionsmuster des mobilen Roboters MR-HC10 übertragene Konzept (siehe TP D) sieht vor zur Absicherung die Sicherheitssteuerungen der mobilen Plattform und des Manipulators zu koppeln sowie um eine Sicherheits-SPS zur umfangreichen Anbindung sicherer Ein- / Ausgänge zu erweitern. Letztere ist zur Kosteneinsparung am Funktionsmuster entfallen, wird allerdings in Teilen von der vorhandenen Robotersteuerung ersetzt.

Um den HC10 im kollaborierenden Betrieb einsetzen zu können, muss die Gefahr für Menschen möglichst reduziert werden. Hierfür stehen Methoden wie eine Arbeitsraum-, Drehmoment- oder Geschwindigkeitsüberwachung zur Verfügung. Die letztendliche Realisierung erfolgte durch folgende Module: die Functional Safety Unit (FSU) zur kinematischen Überwachung des Manipulators und der Werkzeuge sowie zur Anbindung von Betriebsmitteln über sichere Ein- / Ausgänge (anstelle der Sicherheits-SPS), die Power and Force Limitation (PFL) sowie den Safety Logic Circuit (SLC, logische Verknüpfung von Funktionen aus PFL, FSU und sicheren E/A). Zusätzlich erlaubt die Architektur die Einbindung und Symbolfusion mit nicht-sicheren Sensoren.

Abbildung 21 zeigt die unterschiedlichen eingesetzten sicheren Sensorsysteme in Kombination. Sichere Laserscanner (5) überwachen das Umfeld der Plattform. Indes kein Schutzfeld auslöst, befindet sich die YRC1000-Steuerung des Manipulators (1) im konventionellen Modus. Die Kraft- und Leistungsbegrenzung ist hier für den Menschen unsicher parametrisiert. Dennoch wurde eine zweikanalige Arbeitsraumüberwachung vorgesehen, um sicherzustellen, dass sich der Manipulator nur im Bereich der Plattform bewegt. Durch die weniger empfindlich geschalteten Sensorschwellwerte ist ein fahrtbegleitender Betrieb des Manipulators möglich (andernfalls könnten Erschütterungen einen sicherheitsgerichteten Halt auslösen). Zusätzlich überwachen vier unabhängige Ultraschallschutzfeld in sicherer Technik (2) die Plattformgrenze. Um tote Winkel der Laserscanner bei der Plattformdrehung abzusichern, wurden seitlich angebrachte taktile Schaltleisten (3) in sicherer Technik eingesetzt. Durch zusätzliche Funktionsmuster von kapazitiven Sensorkappen (4) am Manipulator sowie einer prototypischen Ultraschallüberwachung des Endeffektors (2), wurde eine Absicherung des Manipulators und des Werkzeugs als Ergänzung zu der zertifizierten Kraft- und Leistungsüberwachung realisiert.

Kommt es im Betrieb zu einer Auslösung der äußeren Laserscannerschutzfelder oder navigiert die Plattform in ein Use Case Szenario mit vorgesehener Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) – eine Lokalisierung und sicherer Technik vorausgesetzt, so wird die Plattform und der Manipulator in den MRK-Modus versetzt. Hierzu wird die Geschwindigkeitsüberwachung sowie die Kraft- und Leistungsbegrenzung aktiviert und mit für das jeweilige Use Case Szenario spezifischen Parametersätzen (abhängig von der jeweiligen Risikobeurteilung) parametrisiert. Wird folgend das Ultraschallfeld der Plattform ausgelöst, so wird der Manipulator in den sicherheitsgerichteten, überwachten Halt versetzt. Für Szenarien, in denen der Manipulator über die Plattform hinaus agieren muss (bspw. bei Kommissioniervorgängen), wird das dem Regal zugewandte Ultraschallschutzfeld deaktiviert sowie die zusätzlichen kapazitiven Kappen und die Werkzeugüberwachung aktiviert. Ebenso wird zeitgleich die Arbeitsraumbegrenzung für den Regalbereich anhand vorgegebener Konfigurationen bis zum Vorgangsende erweitert.

Arbeitspaket 2.2.2: Funktionale Fusion der im Netzwerk verfügbaren Sensordaten

Ziel der Sensordatenfusion in diesem AP war es, die auswertbare Informationsmenge und -qualität durch Integration multipler Sensordaten zu erhöhen sowie den benötigten Zeitraum bis zu einem erfolgten Informationsgewinn zu verkürzen. Die Untersuchungen gliedern sich wie folgt:

- Identifikation komplementärer Sensorpaarungen zur Manipulatorabsicherung,
- Merkmalsfusion zur Objektdetektion und -klassifikation im Umfeld der Plattform sowie
- Fusion komplementärer Sensoren zur Erfassung der Plattform-Relativbewegung

Bezüglich geeigneter Sensorkombinationen zur Manipulatorabsicherung konnten in den Untersuchungen die folgenden zweckmäßigen Sensorbündles zur Datenfusion sowie deren Anbringung und Ausrichtung (externe Sensoren) identifiziert werden: Manipulator-Encoder, Kraft-Momenten-

Sensoren, Ultraschall für den weiteren Nahbereich des Manipulators sowie 3D-Kameras und PIR-Sensoren als zusätzlicher Informationsträger hinsichtlich der Menscherkennung im kurzen und mittleren Entfernungsbereich. Darüber hinaus antizipiert eine kapazitive Sensorhaut für den direkten Kontakt mit Menschen und im Nahbereich von wenigen Zentimetern des Manipulators eine sinnvolle Ergänzung hierzu (weitere Details siehe Zwischenberichte).

Im Rahmen der Fusion zur Erfassung der Umgebung der mobilen Plattform wurde zur Zuverlässigkeits- und Robustheitssteigerung die Kombination von Laserscannern und 3D Stereokameras untersucht. Es konnte im Rahmen der Untersuchungen ein Ansatz erarbeitet werden, welcher die hohe Genauigkeit und das niedrige Rauschen des 2D-Laserscanners mit dem 3D-Erfassungsbereich der Stereokamera fusioniert und somit die Detektion kritischer Objekte in der Plattformumgebung auch für durch den Laser nicht erfassbare Objekte sicherstellt.

Zur Genauigkeitssteigerung der Plattformrelativbewegung wurde die Fusion von inertialen Messdaten (IMU und Raddrehzahlsensoren) mit den Daten des LiDARs umgesetzt und die Robustheit hinsichtlich Störeinflüsse genauer untersucht. Durch die Kombination der Informationen der Relativbewegung der Plattform können globale Mehrdeutigkeiten aufgelöst werden, während die hohe Genauigkeit und der hohe Erfassungsbereich des Scanners die Fehler der Inertialdaten ausgleichen kann. Die erzielten Ergebnisse lassen darauf schließen, dass über diese Kombination in Indoor-Szenarien (wie der des Use Case) eine robuste Positionsbestimmung ermöglicht werden kann. Da die Fa. Grenzebach auf ihrer Plattform bereits eine ähnliche Methode zur Lokalisierung in Verbindung mit dem hauseigenen Flottenmanager zur Verfügung stellt und im Verlauf des letzten Projektjahres durch die Forschungspartner eine geeignete Schnittstelle für die Ansteuerung der Navigationssoftware erarbeitet wurde, wurde für die Lokalisierung der Plattform im Use Case abschließend auf diese Lösung gesetzt.

Arbeitspaket 2.2.3: Modellierung der Umgebung von mobilen Plattformen

Im Rahmen der ersten beiden Projektjahre konnten bereits zahlreiche Erkenntnisse bezüglich der Modellierung der Umgebung von mobilen Plattformen erreicht werden. Dies umfasste unter anderem die räumliche Visualisierung der sensorisch erfassten Umgebung und einzelner spezifischer Sensordaten zur einfacheren Interpretation durch den Menschen, die Abbildung der Plattformumgebung in einem KI-geeigneten Format sowie in Form einer objektbasierten Umgebungsmodellierung unter Einbeziehung vorhandener Unsicherheiten bezüglich Identität und genauer 6DoF-Pose der detektierten Objekte. Spezieller Fokus dieses AP lag zudem auf der Detektion der für den Use Case kritischen Entität Mensch. Hier wurden Methoden zur Erkennung und Klassifikation mittels Ultraschall, Laserscanner und Kamerasensorik erarbeitet und evaluiert, um sowohl Zuverlässigkeit als auch Robustheit der Detektion zu gewährleisten (unterstützt durch studentische Arbeiten am Lehrstuhl LIKE: Hofmann 2018; Qiu 2018; Pfeuffer 2018; Fichtner 2019).

Den Anmerkungen der vergangenen Begutachtung folgend wurde der Schwerpunkt hinsichtlich der Erkennung und Modellierung der Umgebung im dritten Projektjahr auf die Nutzung der auf der Plattform verfügbaren und für den Use Case als relevant erachteten Sensoren fokussiert.

Objekt- und Menscherkennung durch Fusion von Laser und Kamera

Durch die standardmäßige Integration zweier Lasersensoren in die Plattform des Industriepartners Grenzebach und der daraus entstehenden Relevanz für den Use Case wurde im dritten Projektjahr

fortführend die Erkennung und Klassifikation von Objekten mittels Laserdaten untersucht. Durchgeführt wurden die Forschungsarbeiten auf einem Teildemonstrator, da zum Zeitpunkt der Bearbeitung leider kein Zugriff auf Lidardaten des Gesamtdemonstrators möglich war.

Um die Umgebung sowohl in den Navigations- als auch Use Case relevanten Interaktionsszenarien erkennen und entsprechend abbilden zu können, wurde der Fokus spezifisch auf die Identifikation von Menschen ausgerichtet. Als erste Komponente wurden hierzu zahlreiche in verschiedenen Literaturquellen vorgestellte Merkmale für die Erkennung von Objekten identifiziert, kombiniert und spezifisch hinsichtlich der Eignung zur robusten Menschenerkennung untersucht. Unter Nutzung von neunzehn Merkmalen und eines mit 5968 positiven und 4577 negativen Beispielen trainierten Klassifikators konnte eine richtige Erkennung von menschlichen Beinen in 97.82 % der Fälle erzielt werden. Um die Szenarien des Use Case möglichst gut abbilden zu können, wurden verschiedenste Testszenarien von einzelnen und mehreren, stehenden und bewegten Personen untersucht. Der Nachteil lernbasierter Methoden ist der üblicherweise sehr hohe Anspruch an die Hardware. Um eine solche merkmalsbasierende Klassifikation auf dem realen Demonstrator dennoch entsprechend rechen- und energieeffizient gestalten zu können, wurden weiterführende Untersuchungen zur Kosten / Nutzen-Abwägung der Merkmale angestellt. Auf diese Weise konnte ein minimales Set von acht Klassifikationsmerkmalen identifiziert werden, welches trotz reduzierter Komplexität die Erkennungsrate sogar minimal auf 97,90 % verbessern konnte und mit stark reduziertem Rechenaufwand einhergeht.

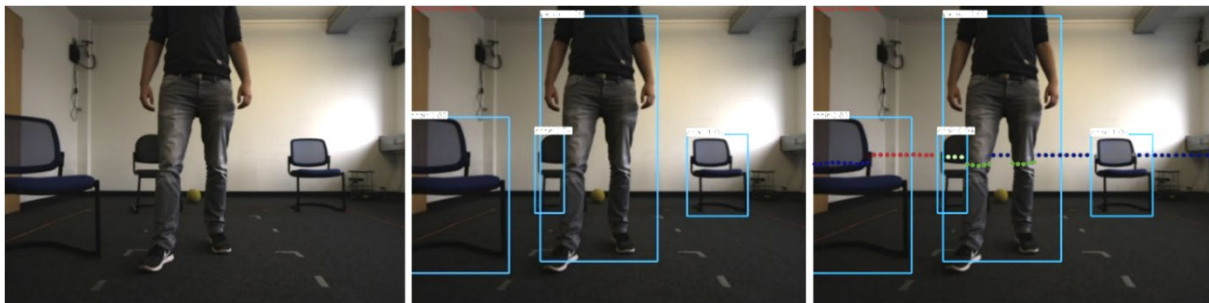


Abbildung 22: Fusion von Laserdaten und Kamerabildern zur Detektion und Lokalisierung von Objekten in der Umgebung der mobilen Plattform. (links: Kamerabild; mittig: kamerabasierte Objektdetektionen; rechts: Bild und projizierte Laserdaten); Quelle: Fichtner 2019

Die Detektion von Menschen ist durch den entwickelten Ansatz wie gezeigt möglich, konnte in den Untersuchungen jedoch nicht als durchweg robust und zuverlässig befunden werden. Um diese Herausforderung zu überwinden und zudem die Detektion sowie Lokalisierung von anderen im Use Case relevanten Objekten zu ermöglichen, wurde eine Erweiterung unter Ausnutzung der komplementären Eigenschaften der auf der Plattform verfügbaren Sensoren Lidar und Kamera erarbeitet. Das Kamerabild bietet hier einen großen Informationsgehalt für die Erkennung von Objekten, kann diese Resultate allerdings nur in der 2D-Bildebene ohne oder nur mit ungenauer realer Entfernungsinformation darstellen. Die Laserscanner hingegen bieten für die Objekterkennung eine geringere verwertbare Informationsvielfalt, während hier jedoch die hochgenaue Tiefeninformation ein Alleinstellungsmerkmal darstellt. Die Kombination dieser in den Eigenschaften komplementären Sensoren ermöglicht die Nutzung der Vorteile beider einzelnen Prinzipien, wie in Abbildung 22 am Beispiel eines Menschen und Stuhls dargestellt. Die so identifizierten und mit semantischer Information angereicherten Objekte stehen nun als Eingangsdaten für das bereits

im Verlauf des zweiten Projektjahres erarbeiteten und im dortigen Bericht näher ausgeführten objektbasierten Umgebungsmodell zur Verfügung.

Nutzung im Use Case vorhandener Infrastrukturinformationen

Im Hinblick auf den industriellen Use Case sind für die Navigation der mobilen Plattformen, sowohl bei der im Projekt eingesetzten Ausführung der Firma Grenzebach als auch bei einer Vielzahl weiterer erhältlicher Plattformen, vorab bereits so genannte Rasterbelegungskarten der Arbeitsumgebung vorhanden, welche die Grundlage für die in der Pfadplanung verwendeten Algorithmen darstellen. Diese verfügbare Informationsquelle wurde im Laufe des letzten Projektjahres als zusätzlicher Dateneingang untersucht, um semantische Informationen für die Umgebungsklassifikation und -modellierung zu extrahieren. Es wurde ein Verfahren auf Basis von maschinellem Lernen entwickelt, welches eine automatisierte Extraktion relevanter Daten und deren Umwandlung in eine effiziente, semantisch angereicherte objektbasierte Darstellung der Umgebung durchführt, die durch den Menschen als auch Roboter gleichermaßen interpretierbar ist und direkt zur Navigation genutzt werden kann (Ergebnisse in Abbildung 23 dargestellt).



Abbildung 23: Extraktion infrastruktureller Information aus Belegungs rasterkarten und Bereitstellung semantisch klassifizierter Daten für die Weltmodellierung (Hiller, M. et al. 2019)

Integration dynamischer Aspekte in die Weltbeschreibung

Auf Grund der zunehmend hohen Veränderlichkeit von heutigen industriellen Umgebungen und der Anforderung, auch Werker und andere dynamische Komponenten abbilden zu können, wurde das im Laufe des zweiten Projektjahres entwickelte Weltmodell entsprechend erweitert. Durch die Abstraktion jeder Komponente der Umgebung mittels einer Kombination aus eindeutigem Bezugspunkt und zugehöriger Geometriebeschreibung konnte eine Modellbeschreibung erarbeitet werden, welche gleichermaßen die Eigenschaften statischer als auch dynamischer Objekte in einer generalisierten Beschreibung vereint (siehe Abbildung 24). Durch die Anlehnung an die übliche punktartige Beschreibung dynamischer Entitäten durch den zugewiesenen Bezugspunkt wird die einfache Integration der Modelle in gängige Methoden des Trackings gewährleistet. Genauere Einblicke in die dynamischen Modelle und Methoden zur Bewegungsnachverfolgung und -vorhersage sind nachfolgend im Arbeitspaket 2.2.4 erläutert.

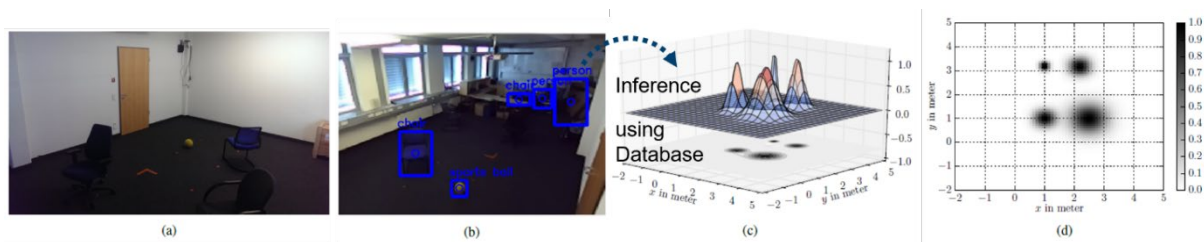


Abbildung 24: Objektbasierte Modellierung der Umgebung unter Ausnutzung der semantischen Informationen aus Klassifikation und unter Berücksichtigung der Auswirkung von Messungenauigkeiten auf die geschätzten Objektpositionen (Hiller et al. 2018)

Arbeitspaket 2.2.4: Stochastische Modellierung bewegter Hindernisse

Zusätzlich zur in AP 2.2.3 durchgeführten Erkennung beweglicher Teilnehmer muss die Bewegung einzelner Teilnehmer stochastisch charakterisiert werden, um dadurch Informationen über die aktuelle und zukünftige Bewegung zu extrahieren. Dies umfasst Fragestellungen des Planungs- und Navigationsablaufs, wie das voraussichtliche Ziel des Teilnehmers, die aktuelle Geschwindigkeit oder die Wahrscheinlichkeit für eine Richtungsänderung. Im Use Case dienen diese Informationen einer besseren Umweltmodellierung. Diese wiederum steht sowohl der lokalen Bahnplanung der Plattform als auch der übergeordneten, globalen Bahnplanung (TP 3) zur Verfügung. Innerhalb der lokalen Bahnplanung fungieren diese zusätzlichen Informationen, wie die Prädiktion der Bewegung, u. a. zur frühzeitigen Verlangsamung der Plattform je nach Situation und erkanntem bewegten Hindernis (untersucht in Vyas 2019).

Den Anregungen der letzten Begutachtung folgend wurde der Fokus hierbei speziell auf die für den Use Case relevanten dynamischen Hindernisse, wie Mensch und mobile Plattformen, gelegt.

Analyse geeigneter Modelle zur Beschreibung von Objektbewegungen

Im Bereich der stochastischen Modellierung dynamischer Entitäten kommen so genannte Bewegungsmodelle zum Einsatz. Durch die Vielzahl der in der Literatur vorhandenen Ansätze wurden hier zunächst populäre Modelle grundlegend untersucht, um eine für den Use Case relevante Vorauswahl treffen zu können. Hierzu wurde zuerst die Bewegung eines Referenzkörpers auf einer definierten Trajektorie in Simulation untersucht und die Eignung der Modelle hinsichtlich Bewegungsverfolgung evaluiert. Zusätzlich wurden den Bewegungsdaten sensortypische Rauscharakteren für Entfernungsmesswerte beaufschlagt, um die Einwirkungen realer Messfehler der im Use Case vorhandenen Laser- und Kamerasensorik zu analysieren. Abschließend wurden die in Simulation erzielten Ergebnisse durch Nachstellung des Szenarios unter Einsatz realer Sensorik zur Validierung durchgeführt, und der Nutzen der Modelle entsprechend bewertet. Als besonders geeignet haben sich das so genannte Constant Velocity (CV) Modell, sowie das erweiterte Constant Turn Rate and Velocity (CTRV) Modell herausgestellt.

Das CV-Modell stellt ein Modell geringer Komplexität dar, welches Bewegungen im kontinuierlichen Raum mittels linearer Zusammenhänge beschreibt, was den Einsatz einfacher und performanter Filter zu Trackingzwecken ermöglicht. Die zur Verwendung notwendige Annahme ausschließlich konstanter Bewegung zwischen zwei Zeitschritten konnte für den Use Case als tolerierbar befunden werden. Auftretende Abweichungen der Bewegungsmuster, die bei Menschen präsent sind, sowie Fehler in den Messwerten können größtenteils durch eine geeignete Parametrierung der Prozess- und Messunsicherheit im Algorithmus abgebildet werden.

Eine exaktere Abbildung der Bewegung von Menschen und Robotern ist durch den Einsatz des CTRV-Modells möglich, welches neben der Geschwindigkeit zusätzlich die Drehrate von dynamischen Entitäten abbildet. Da diese Zusammenhänge allerdings nichtlinear sind, erfordert die Verwendung den Einsatz komplexerer Filtermethoden zum Tracking und zur Datenfusion.

Obwohl das komplexere CTRV-Modell im Zusammenspiel mit einem nichtlinearen Filter erwartungsgemäß sowohl in den simulativen Tests als auch der Evaluation auf Realdaten eine exaktere Bewegungsverfolgung der dynamischen Objekte ermöglicht, konnten mittels des einfacheren CV-Modells in Verbindung mit linearen Filtern ebenfalls sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Speziell unter Berücksichtigung der auf der mobilen Plattform eingeschränkt verfügbaren Rechenleistung wurde dies somit für den vorliegenden Use Case als geeigneter befunden.

Identifikation und Tracking bewegter Objekte unter Eigenbewegung

Wie zuvor beschrieben konnte im Rahmen dieses AP gezeigt werden, dass die Modellierung der im Use Case relevanten bewegten Objekte erfolgreich durchgeführt werden kann, sofern die beobachtende Messstation (z. B. Infrastruktur oder der Roboter) stationär sind. Für eine mobile Plattform in Bewegung kommt jedoch eine bislang nicht betrachtete zusätzliche Schwierigkeit durch Verfälschung der wahrgenommenen Bewegungen durch Einfluss der Eigenbewegung hinzu. Durch die Verletzung der Annahme einer stationären Messeinheit sind nicht länger Absolutbewegungen, sondern ausschließlich Relativbewegungen wahrnehmbar. Dies erfordert den Einsatz spezieller Modellierungsarten zur Behandlung der auftretenden Effekte.

Im Rahmen dieses AP wurden unterschiedliche Methoden zur Kompensation dieser Effekte durch Eigenbewegung näher untersucht. Während beim Laserscanner ein einfaches Verfahren durch Scan-Matching bereits gute Ergebnisse erzielte, mussten bezüglich der Kameradaten komplexere Modelle zum Einsatz kommen. Zur Analyse wurden jeweils zwei auf Mono- und zwei auf Tiefenkameradaten basierende Algorithmen herangezogen und auf realen Szenarien eines bewegten Roboters mit im Erfassungsfeld laufenden Menschen evaluiert. Die Nutzung von Stereodaten zeigte eine Verbesserung der Kompensation der Eigenbewegung im Vergleich zu den Methoden unter ausschließlicher Verwendung von Monodaten, was durch den zusätzlichen Tiefeninformationskanal erklärt wird. Eine ideale Kompensation der Eigenbewegung einzig auf Kamerabasis war jedoch in keinem der Evaluationsfälle möglich, sodass für zukünftige Projekte eine Fusion von Laser- und Kamerakompensationsmethoden vorgeschlagen wird.

Arbeitspaket 2.2.5: Bereitstellung von Aktionstelegrammen

Das AP 2.2.5 wurde durch die entwickelte Kommunikations- und Verarbeitungsarchitektur und aufgrund des Einsatzes der ROS-Actionlib in Kombination mit der in Entwicklung befindlichen State Machine obsolet. Die hierbei freigewordenen Kapazitäten der Forschungspartner verteilten sich gemäß der Empfehlung der Begutachter auf die für den Use Case entscheidenden APs wie unter anderem für das Bin Picking von Greifobjekten.

Arbeitspaket 2.3: Infrastrukturunterstützte Ortung

Ziel war die Untersuchung und Entwicklung von Ansätzen zur Verbesserung lokaler Umgebungsmodelle durch die Einbeziehung von in der Infrastruktur verankerter Sensoren. Jeder Sensor einer mobilen Plattform kann abhängig vom Sensorprinzip und der jeweiligen Ausrichtung stets nur eine eingeschränkte Sicht auf die Umgebung liefern. Durch die im vorherigen AP vorgestellten Fusionsmethoden ist zwar ein Zugewinn und eine höhere Abdeckung möglich, jedoch bleibt die

Beschränkung der Umfelderkennung in Form eines lokalen Lagebildes. An kritischen Stellen einer Produktion, wie bspw. Kreuzungen oder an Fußgängerüberwegen, reicht diese lokale Sicht und Modellierung der Umgebung nicht aus, um alle Vorgänge ausreichend zu beschreiben. Für den im Projekt betrachteten Use Case einer im Warenlager navigierenden mobilen Plattform kann die Sicht auf einen sich nähernden Menschen durch ungünstige Sensorausrichtung oder ein blockiertes Sichtfeld versperrt sein. Um das Auftreten solcher Konfliktsituationen zu verringern, müsste der Roboter „um die Ecke schauen können“ oder die Informationen über diese Bereiche aus anderweitig verfügbaren Quellen beziehen können.

Diese Daten mussten zunächst analog zum vorherigen AP hinsichtlich ihrer Eigenschaften charakterisiert und gewinnbringend fusioniert werden. Anschließend wurden Verfahren zur Kombination der lokalen Lagebilder mit den infrastrukturbasierten Informationen erarbeitet.

Arbeitspaket 2.3.1: Stochastische Modellierung von Sensorfehlern

Um eine optimale probabilistische Fusion verschiedener Sensorquellen zu ermöglichen, mussten deren Eigenschaften sowie Fehlverhalten in stochastischer Hinsicht identifiziert und entsprechend modelliert werden. Im Rahmen dieses AP wurden zu diesem Zweck zwei für den Einsatz im Industrieumfeld geeignete Arten von Infrastruktursensoren betrachtet: Funkknoten (Sender und Empfänger) und Deckenkameras (siehe auch Kharboutli 2018; Hofmann 2018). Aufgrund des geringen Preises, der hohen Verfügbarkeit und leichten Montage wurde der Fokus der Untersuchungen im Rahmen des ersten Projektjahres zunächst auf die nähere Analyse von Deckenkamerasystemen in Form von Stereokameras gelegt. Nach der eingängigen Untersuchung verschiedener Kalibrierungsarten zur Reduzierung des mittleren Reprojektionsfehlers wurde anschließend die resultierende Fehlerverteilung erfolgreich zur probabilistischen Weiterverarbeitung stochastisch charakterisiert und durch eine Normalverteilung mit spezifischer Parametrierung approximiert.

Im zweiten Projektjahr wurden die Untersuchungen ergänzend auf funkbasierte Ortungsmethoden ausgeweitet. Es wurde ein System basierend auf einer feldstärkebasierten Winkelschätzung mit Hilfe einer Dualbandantenne für die Lokalisierung einer mobilen Plattform untersucht. Die Lokalisierung erfolgte über die Schätzung der Winkel zwischen Sender und Empfänger, also Roboter und Basisstationen, basierend auf einer vom Eintreffwinkel abhängigen Signaldifferenz der Feldstärken unabhängig von jeglichem Vorwissen über den Übertragungskanal. Aufgrund der inhärenten Nichtlinearität des Schätzprozesses war jedoch ausschließlich eine mehrdeutige Winkelschätzung möglich, sodass zur eindeutigen Bestimmung einer Plattformposition weitere Sensoren (entweder mehrere Sender oder andere Sensorarten) zum Einsatz kamen, was in AP 2.3.3 näher behandelt wurde. Die vorgenommene stochastische Charakterisierung bezog sich hier auf die Modellierung des Winkelfehlers, der bei der Verwendung dieser Lokalisierungsmethode zum Tragen kommt. Drei Fehlerarten wurden in den Analysen betrachtet: der auftretende Mittelwertfehler durch Mehrwegeeffekte, die ebenfalls durch Mehrwegeeffekte auftretende Varianz sowie das Messrauschen des Versuchsaufbaus. Für Einblicke und Details wird auf die entstandene Publikation verwiesen (Kharboutli et al. 2019).

Aufgrund der sehr hohen Komplexität und der starken Szenarienabhängigkeit der auftretenden Fehler wurde der untersuchte Ansatz der feldstärkebasierten Winkelschätzung dieser Ausbaustufe in Indoor-Szenarien als Ortungstechnologie für die praktische Realisierung im Rahmen des Projektes als ungeeignet befunden und im dritten Projektjahr nicht weiterverfolgt. Zur Unterstützung der Umgebungserfassung hat sich speziell für schwer einsehbare Bereiche, die Verwendung von Kamertechnologie als vorteilhafter erwiesen. Durch den Informationsgehalt des Bildmaterials, die

darauf anwendbaren Analysemethoden und die entsprechende Charakterisierung wird der größte Gewinn bei schwer einsehbaren Regalbereichen und engen Gängen erwartet. Hier gilt es allerdings die Richtlinien des Datenschutzes zu berücksichtigen.

Arbeitspaket 2.3.2: Fusion von Sensordaten zur Lagebildererkennung

Durch die Fusion verschiedener infrastrukturbasierter Sensoren wie Kamera und Funk kann zusätzlich zu der objektbezogenen Perspektive aus AP 2.2.2 ein bereichsübergreifendes Lagebild aus Infrastruktursicht erstellt werden, wobei sich die Sensoren hier in ihren Eigenschaften oder Erfassungsbereichen ergänzen. Auf Grund der in AP 2.3.1 hinsichtlich der Eignung der betrachteten Funktechnologie gewonnenen Erkenntnisse wurden anstelle einer Fusion von Kamera und Funk die Fusion mehrerer Kameras mit unterschiedlichen Blickwinkeln auf eine Szene im Rahmen dieses AP untersucht. Als Messsystem kamen die bereits im ersten Projektjahr hinsichtlich stochastischer Fehlermodellierung charakterisierten Stereokameras zum Einsatz. Mittels einer Kombination von drei im Raum verteilten Kamerasystemen mit teils überdeckenden Erfassungsbereichen wurde sowohl die Kombination unterschiedlicher Algorithmen als auch die damit erzielten Objekt-Detektionen untersucht. Es konnte klar gezeigt werden, dass durch die Fusion der multiplen Eingangsdaten auch in Szenarien mit Verdeckungen sowohl die Detektionsrate als auch die Klassifikationsrate gesteigert werden kann, sodass eine durchgehende Positionsdetektion von Personen und anderen dynamischen Objekten ermöglicht wird.

Arbeitspaket 2.3.3: Fusion von Ortung und Umfelderschassung

Durch die Fusion von Informationen aus Quellen der mobilen Einheit mit Daten der Infrastruktur entsteht die Möglichkeit, auch Bereiche zu erfassen und Aufgaben zu erledigen, die durch die einzelnen Subsysteme nicht möglich wären. In Umgebungen, in welchen Mensch und Roboter koexistieren oder kooperieren sollen, ist eine Erkennung und Nachverfolgung der Bewegungen von Menschen erforderlich, um das Auftreten kritischer Konfliktsituationen zu minimieren.

Im ersten Projektjahr konnte bereits der Zugewinn hinsichtlich Positionstracking von mobilen Entitäten wie Mensch und Roboter durch die Fusion von Infrastrukturkameras und dem plattformeigenen Laserscanner gezeigt werden. Durch die Entwicklung einer spezifischen Verarbeitungskette konnten entstehende Herausforderung wie die korrekte Datenassoziation und auftretende Synchronisierungsprobleme bewältigt werden. Im zweiten Projektjahr wurde der Fokus auf die Integration einer funkbasierten Ortungsmöglichkeit mit der plattformeigenen Odometriesensorik gelegt. Der auf einem Partikelfilter basierende entworfene Fusionsansatz nutzt die mittels der Odometrie gesammelten Daten zur initialen Prädiktion der Relativbewegung der mobilen Plattform, wohingegen die auf Basis der Feldstärkedifferenz ermittelten Winkelschätzungen der Funksensorik anschließend im Update-Schritt zur Korrektur dieser initialen Prädiktionen genutzt werden (Kharboutli et al. 2019).

Nach der erfolgreichen Integration von Funkortung und Odometrie sowie der Erarbeitung einer Fusionslösung von Infrastrukturkameras und Laserscanner konnte dieses AP mit vielversprechenden Ergebnissen und Erkenntnisgewinnen bezüglich einer Unterstützung der Plattformumgebungserfassung durch infrastrukturell verankerte Systeme abgeschlossen werden.

Arbeitspaket 2.4: Trajektorienplanung Manipulator

Die Trajektorienplanung des Manipulators zur Erfüllung einer Aufgabe, stellt einen wesentlichen Schlüssel einer autonom agierenden und wertschöpfenden Plattform dar. Das vorliegende AP untersuchte hierzu zum einen das Referenzieren des Manipulators, Ausweichstrategien des Manipulators bei der Kooperation von Menschen und Roboter, die zweckmäßige Auswahl von Bahnplanungsalgorithmen sowie Algorithmen zur Klassifikation und 6DoF-Poseschätzung von Objekten. Bezüglich des Use Cases sind diese Aspekte für das Greifen von Sichtlagerkisten und Motoren aus dem Regalbereich, für den Griff in die Kiste und das fahrbegleitende Bestücken einer Vorrichtung sowie allgemein für die Handhabung von Use Case Objekten relevant.

Folgende Abbildung 25 zeigt beispielhaft einen der Einzeldemonstratoren des AP 2.4.:



Abbildung 25: Einzeldemonstrator am Standort Erlangen u. a. mit Yaskawa HC10 (A), Yaskawa SIA10F (B), MAN Vor montagevorrichtung (C), roboception Stereokamera (D) sowie untersuchte Use Case Komponenten (1 bis 5).

Der dargestellte Demonstrator am Standort Erlangen besteht aus den beiden Knickarmrobotern Yaskawa HC10 (A) und Yaskawa SIA10F (B). Die den Knickarmrobotern beigestellten Tischaufbauten sind an die Arbeitsfläche der realen mobilen Plattform MR-HC10 angelehnt. Innerhalb des APs untersucht und entwickelt wurden die Use Case Bestandteile des Aufgreifens von Sichtlagerkisten aus einem Lagerregal (E), das Greifen von Elektromotoren aus dem Regal, der Griff in die Kiste (Bin-Picking) von unterschiedlichen Industriekomponenten sowie das Bestücken einer Vor montagevorrichtung der Firma MAN (C). Die Aufgaben sowie die eingesetzte Hardware sind dabei an den Gesamtdemonstrator soweit möglich angelehnt. Eingesetzt werden eine roboception rc_vidard65 Stereokamera (E) mit Zufallspunktemustergenerator zur Erhöhung der Punktwolken dichte sowie ein elektromechanischer Zweifingergreifer (F) der Firma PTM.

Abbildung 25 zeigt ebenso die untersuchten Handhabungskomponenten (1 bis 5). Von besonderer Relevanz sind dabei die drei im Use Case fokussierten texturlosen, metallischen Komponenten des Partners MAN. Hierbei handelt es sich um die folgenden Bestandteile einer LKW-Hinterachs differentialsperr: Schaltgabel (1), Schaltstange (2) sowie Schaltmuffe (3). Die übrigen abgebildeten Komponenten sind texturlose, metallische Steckergehäuse (4) sowie diverse Teile des Industriepartners Siemens GWE (5).

Die Forschungsfragen zur Trajektorienplanung des Manipulators wurden forschungsseitig von den Partnern iwb / TUM und FAU / LS FAPS fokussiert. Die Unterarbeitspakete zu Ausweichstrategien (AP 2.4.2) sowie zur 6DoF-Poseschätzung und zum Bin-Picking (AP 2.4.4) wurden gemeinschaftlich von den Partnern der FAU (LS FAPS und LS LIKE) mit Industriepartnern adressiert.

Arbeitspaket 2.4.1: Referenzieren des Manipulators und Erstellung eines virtuellen Abbildes der lokalen Umgebung

Ziel des vorliegenden APs war es, die Position des Manipulators relativ zu seiner Umgebung zu referenzieren. Ebenso sollte ein virtuelles Abbild der Umgebung erzeugt werden, dass alle kollisionsrelevanten Objekte enthält. Der Fokus des ersten Projektjahres lag hierbei auf Simulationen zur Umfelderkennung mit vom Manipulator geführten 3D-Sensoren. Diese Methode eignet sich zur Erkennung von quasi-statischen, unbekannten Umgebungen. Hieran anknüpfend wurden im zweiten Projektjahr die Verwendung von Markern für das Referenzieren von Regalen und zur Lokalisierung von Sichtlagerkisten im Use Case untersucht und weiterentwickelt. Daran anschließend erfolgte die Ergebnisdokumentation hinsichtlich der Eignung künstlicher neuronaler Netze bei der Klassifikation und 2D-Lokalisierung von Greifobjekten innerhalb von Regalen. Das Unterarbeitspaket konnte im zweiten Projektjahr erfolgreich abgeschlossen werden. Eingesetzt wird letztendlich das in der Roboception rc_visard65 Kamera-integrierte Modul Tag-Detect. Dieses eignet sich zur Erkennung von über 100 AprilTags bzw. QR-Codes gleichzeitig (Multi-Tag-Detection). Neben der Erkennung selbst, stellt das Modul ebenso die Pose (Position und Lage) der Tags bereit.

Arbeitspaket 2.4.2: Prognose dynamischer Objekte und Entwicklung verschiedener Ausweichstrategien zur sicheren Kooperation von Mensch und Roboter

Ziel dieses AP war es unter anderem Produktivitätssteigerungspotenziale bei MRK-Szenarien zu untersuchen. Dazu sollten Bewegungen von dynamischen Objekten prognostiziert werden und verschiedene Ausweichstrategien in der Manipulatorbahnplanung entwickelt werden. In den ersten beiden Projektjahren wurden hierzu in AP 2.2 Methoden zur dynamischen Mensch- und Umfelderkennung entwickelt. Innerhalb des vorliegenden AP wurden ausweichende Bewegungen auf Vektorbasis errechnet und im Interpolationstakt der Robotersteuerung deterministisch in eine laufende Aufgabenerfüllung des Roboters (bspw. Handhabungsaufgabe) als Bahnabweichung eingebracht. Ziel der Untersuchungen war es, eine Aufgabenfortsetzung des Manipulators trotz Annäherung eines Menschen, also ohne Notwendigkeit zur Stillsetzung zu erreichen. In den durchgeführten Versuchen sollte der Manipulator echtzeitnah einem sensorisch erfassten Menschen ausweichen. Im zweiten Projektjahr wurde der Untersuchungsumfang des vorliegenden APs auf eine ultraschallbasierte Werkzeugabsicherung ausgedehnt.

Folgende Abbildung 26 veranschaulicht die Untersuchungsergebnisse des 1. und 2. Projektjahres:

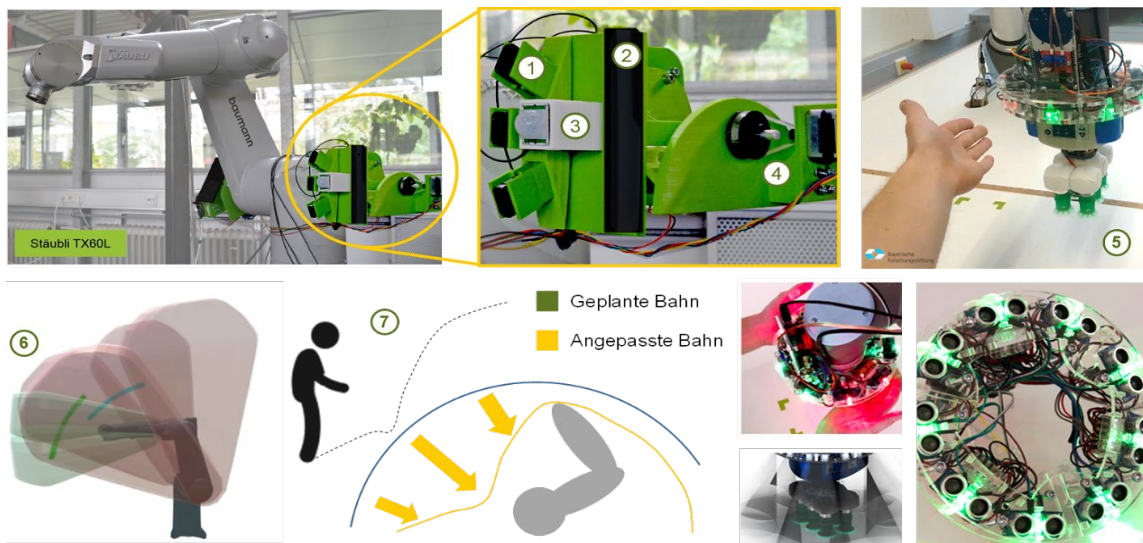


Abbildung 26: Versuchsaufbau zu zeitgerechten, deterministischen Ausweichbewegungen, mit dem Ziel der Reduktion von Stillstandszeiten (links) sowie Versuchsaufbau zur Ultraschallwerkzeugabsicherung (oben rechts, (5)). Bilder (Lieret 2017; Mattejat 2018; Neubauer 2018)

Aspekte der ausgeführten Ergebnisse wurden durch die am Lehrstuhl FAPS entstandenen und betreuten Arbeiten (Lieret 2017; Mattejat 2018; Schmitt 2017; Neubauer 2018) unterstützt.

Abbildung 26 zeigt zum einen den Versuchsaufbau zu zeitgerechten, deterministischen Ausweichbewegungen mit dem Ziel der Reduktion von Stillstandszeiten (oben links) sowie den Versuchsaufbau zur ultraschallbasierten Werkzeugabsicherung (oben rechts).

Für die Ausweichbewegungsversuche kam ein Knickarmroboter des Typs Stäubli TX60L mit einem für die Untersuchungen zusammengestellten Sensorbundle zum Einsatz. Dieses setzte sich wie folgt zusammen: zertifizierte Ultraschallsensoren (1), Stereokamera (2), PIR-Sensoren (3) sowie mechatronische Einheit zur Ausrichtung des sensorischen Erfassungsbereichs (4). Die resultierenden Sensordaten dieser komplementären Erfassung wurden in einem Umgebungsmodell repräsentiert und während der Versuchsdurchführung visualisiert (6). Aus den Sensordaten wurden Ausweichbewegungen errechnet und der Manipulator vektoriell von seiner ursprünglich geplanten Bahn abgelenkt. In Abbildung 26 (7) wird dies schematisch skizziert.

Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass das Integrieren vektorieller Ausweichbewegungen in die Steuerung ausreichend deterministisch und zeitgerecht erfolgen kann, jedoch der Stand der Technik aktuell noch keine zertifizierbare Berechnung von Ausweichvektoren auf Basis der Sensordaten erlaubt. Weiterführende Details zu den Ergebnissen und zu den Umsetzungen sind in den beiden Zwischenberichten dokumentiert (siehe Zwischenbericht 2017 & 2018 – AP 2.2).

Arbeitspaket 2.4.3: Autonome Bahnplanung

Ziel des vorliegenden APs war es, basierend auf dem virtuellen Abbild der Umgebung, möglichst optimale Manipulatortrajektorien zu planen. Der Fokus des ersten Projektjahres lag auf der CAD-Daten basierten Greifpunktbestimmung. Im zweiten Projektjahr wurden abschließend Versuchsreihen zur optimierten Bahnplanung für die verschiedenen innerhalb des Use Case anzutreffenden Szenarien durchgeführt.

Das eingesetzte ROS / MoveIt nutzt die Open Motion Planning Library (OMPL) zur Lösung von Bahnplanungsproblemen. Diese Bibliothek verfügt über eine Vielzahl von verschiedenen Algorithmen mit unterschiedlicher Logik. Zur Auswahl des performantesten Algorithmus wurden mehrere Testreihen durchgeführt. Untersucht wurden RRTConnect (default), LKPIECE sowie RRT*. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass RRTConnect bei unbekannter bzw. einer sich dynamisch verändernden Umgebung und unterschiedlichen Anwendungsfällen am besten geeignet ist. RRTConnect übertrifft RRT* im Durchschnitt 23,4 s (Summe: Berechnungsdauer + Ausführungsdauer) im Vergleich zu 26,7 s. RRT* liefert dagegen die kürzeste Bahn und Ausführungsdauer, falls dem System ausreichend Planungszeit gegeben wird, sodass die optimale Bahn gefunden wird (Albrecht 2018). Da im Fertigungsalltag insbesondere bezüglich mobiler Robotersysteme nicht für jede denkbare Bahn die optimale Berechnungsdauer bestimmt werden kann, empfiehlt es als abschließendes Ergebnis RRTConnect zu bevorzugen.

Arbeitspaket 2.4.4: Genaue Objektposeschätzung und Greifen von Komponenten

In diesem AP wurden Algorithmen und Methoden untersucht und entwickelt, um Greifobjekte zu klassifizieren, zu lokalisieren und insbesondere möglichst genau deren 6DoF-Pose im Raum zu schätzen. Dies ist eine wesentliche Notwendigkeit, um innerhalb einer im Vorfeld unbekannten, dynamischen Umgebung mittels mobiler Roboter agieren zu können. Die abgeleiteten Informationen sollten darüber hinaus anderen Systemen und Fähigkeiten (u. a. der Umgebungsmodellierung und somit auch dem Augmented Reality Teleoperations- und Interventionssystem, siehe TP 4) zur Verfügung stehen.

Als Ergebnis des zweiten Projektjahres hat sich ergeben, dass für das Erkennen und Poseschätzen von Sichtlagerkisten sowie von Motoren im Use Case, sich Tags am besten eignen. Regale, Sichtlagerkisten und Einzelkomponenten sind in Lagern von produzierenden Unternehmen beschriftet. Zusätzlich aufgedruckte Tags sind somit denkbar. Wie bereits im Rahmen des AP 2.4.1 beschrieben, eignet sich das Roboception Modul „TagDetect“ auf Basis von AprilTags gut für diese Aufgabenstellung und wurde daher für den Einsatz am Gesamtdemonstrator übernommen.

Ein relevantes Forschungsfeld ist das Bin-Picking bzw. das hierzu erforderliche Klassifizieren, Lokalisieren und 6DoF-Poseschätzen texturloser, metallischen Komponenten der Produktionsumgebung. Innerhalb von FORobotics erfolgten hierzu seit 2017 Untersuchungen und Entwicklungen am Beispiel der Use Case Komponenten (siehe Abbildung 25). Konkret handelte es sich hierbei um: Schaltstangen (2), Schaltmuffen (3) sowie Schaltgabeln (1).

Während initiale Untersuchungen des zweiten Projektjahres den Einsatz klassischer Feature-basierter Verfahren (wie SIFT oder SURF) für ungeeignet befanden, wurden zu Beginn des dritten Projektjahres die Algorithmen Correspondence Grouping (PCL-Bibliothek, (Aldoma et al. 2014)), SingleShotPose (Tekin et al. 2018) sowie das Template-Matching Verfahren LINEMOD (Hinterstoisser et al. 2013) hinsichtlich Eignung zur 6DoF-Poseschätzung untersucht und bewertet.

Während der PCL-Ansatz für nicht hinreichend robust befunden wurde, zeigte SingleShotPose zunächst gute qualitative Ergebnisse, diese konnten jedoch in der quantitativen Bewertung nicht bestätigt werden. LINEMOD wies grundsätzlich genaue Poseschätzungsergebnisse auf, allerdings wurde eine nicht akzeptable False-Positives-Rate sowie lange Verarbeitungszeiten bemängelt.

Zur Lösung der beschriebenen Herausforderungen wurde erfolgreich ein eigener Pipeline-Ansatz durch die Kombination einer verfügbaren CNN-basierten Vorsegmentierung zusammen mit LINEMOD entwickelt und optimiert (A. Blank, M. Hiller et al. 2019). Zum Einsatz kamen dabei der SingleShot-Predictor YOLO (You Only Look Once, (Joseph Redmon und Ali Farhadi 2018)) zur

Vorsegmentierung sowie Iterative Closest Point (ICP, (Lin et al. 2014)) für die Verbesserung des Ergebnisses. Die Pipeline ermöglicht die Elimination der festgestellten False-Positives, senkt die Verarbeitungszeiten feststellbar, verbessert die erzielbaren Genauigkeiten gegenüber dem originalen LINEMOD sowie ermöglicht das LINEMOD-basierte Poseschätzen in realen Bin-Picking Szenarien mit sich überlagernden Objekten (Blank et al. 2019).

Abbildung 27 zeigt das Ergebnis der veröffentlichten Pipeline (Blank, A.; Hiller, M. et al. 2019).

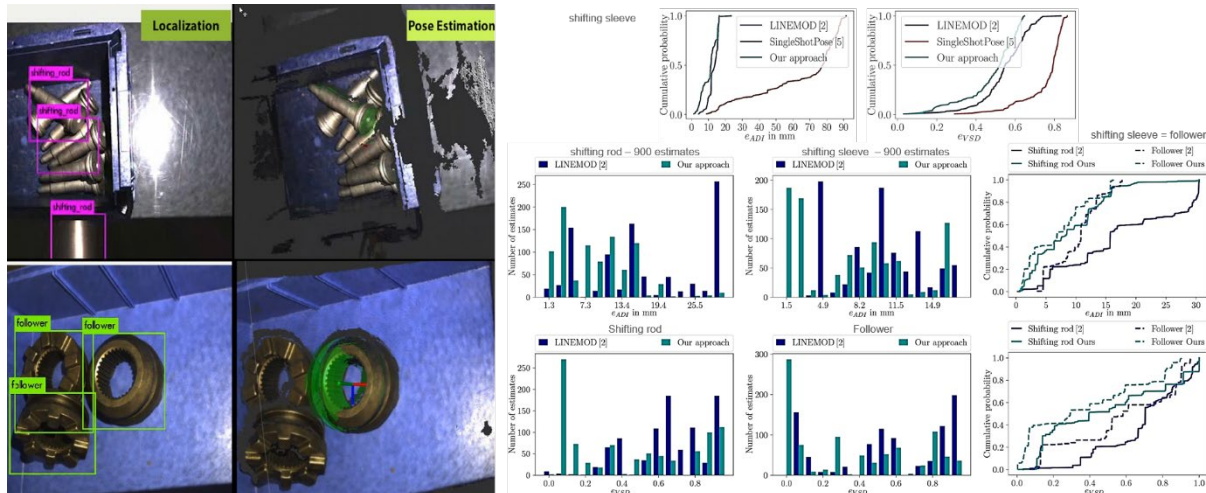


Abbildung 27: Qualitatives Ergebnis der Lokalisierung, Segmentierung und Poseschätzung (links) am Beispiel von Schaltstangen (oben) und Schaltmuffen (unten); Benchmarking-Ergebnisse anhand etablierter Fehlermetriken (rechts); (Blank, A.; Hiller, M. et al.; ECMR, 2019)

Zur Bewertung wurde ein Benchmarking unserer Pipeline gegenüber dem originalen LINEMOD sowie gegenüber SingleShotPose anhand etablierter Fehlermetriken bei der Poseschätzung, wie Average Distance (e_{ADI} , (Hinterstoisser et al. 2013)) sowie Visible Surface Discrepancy (e_{VSD} , (Hodaň et al. 2018)) und im Vergleich der Trefferquoten durchgeführt. Betrachtet wurden Einzel- sowie Multi-Objektszenarien. Letztere entsprechen einem Bin-Picking Anwendungsfall. Die Realdatensätze umfassten eine Variation an Objekten sowie Kameraposen. Der Hauptevaluationsdatensatz beinhaltete hier über 3600 Messungen. Bereits im Einzel-Objektszenario schied SingleShotPose für den Anwendungsfall aufgrund für den Use Case nicht-akzeptabler Poseschätzungsabweichungen aus. Für die Schaltstange (Durchmesser 35 mm) ergab sich bspw. bei einer kumulativen Wahrscheinlichkeit von 80 % eine Abweichung gemäß e_{ADI} von 85 mm. LINEMOD und unser Ansatz auf Basis von LINEMOD erzielten hier dagegen akzeptable Ergebnisse im Bereich von unter 15 mm. Insbesondere bezüglich der Trefferquote zeigt unsere Pipeline signifikante Verbesserungen gegenüber dem originalen LINEMOD – z. B. Schaltstange im Einzel-Objektszenario: 72 % gegenüber 34 % sowie Multi-Objektszenario: 67 % gegenüber 0 %. Die ausführlichen Ergebnisse sind in der entsprechenden Veröffentlichung dokumentiert.

Die Pipeline wurde gemäß der entwickelten Verarbeitungsarchitektur (AP 2.1) als Fähigkeit auf Basis der ROS-Actionlib umgesetzt. Sie dient am Gesamtdemonstrator der Erkennung, Lokalisierung und Poseschätzung gesuchter, im Vorfeld antrainierter Handhabungsobjekte. Eine verbesserte Variante der kombinierten Pipeline mit der Besonderheit des zeiteffizienten Generierens von Trainingsdatensätzen auf Basis von in Teilen synthetisch erzeugter 2D-RGB und 3D-Daten war Bestandteil der Arbeiten des letzten Projektjahres. Hierzu wurde unter anderem LINEMOD durch

Frustum PointNets (Qi et al. 2018) ersetzt. Zur Generierung von 2D-RGB und 3D-Trainingsdaten wurde erfolgreich das Nvidia NDDS Plugin der Unreal Engine eingesetzt.

Ist kein Pose-definiertes Greifen von Objekten erforderlich (bspw. da keine Pose-definierte Bereitstellung an Folgeprozesse gewährleistet werden muss) oder sollen im Vorfeld unbekannte oder individuelle Handhabungsobjekte gegriffen werden, eignen sich insbesondere Algorithmen zur generativen Greifposebestimmung. Im Rahmen des letzten Projektjahres wurde daher der Algorithmus GG-CNN (Morrison et al. 2018) prototypisch als Fähigkeit implementiert, bewertet sowie als Erweiterung für beschriebene Szenarien als prinzipiell geeignet befunden. Aktuelle Arbeiten optimieren GG-CNN Trainingsdaten zur Anpassung an Produktionsbegebenheiten.

Arbeitspaket 2.5: Bahnplanung mobile Plattform

Klassischerweise bewegen sich fahrerlose Transportsysteme auf festen Spuren durch die Produktionsumgebung. Der Einsatz eines Roboterverbundes in einer hochdynamischen Industrie 4.0-Umgebung erfordert aber eine viel höhere Flexibilität dieser Systeme. Aufgrund des sich ständig im Wandel befindlichen Produktionsumfeldes ist auch eine dauerhafte Anpassung der Fahrwege der mobilen Plattformen erforderlich. Um diese Anforderungen abzubilden, wurden im Verlauf des Projekts verschiedene Ansätze der lokalen Plattformbahnplanung mobiler Roboter in dieser besonders anspruchsvollen Umgebung durch Unterstützung studentischer Arbeiten am Lehrstuhl LIKE (Pittner 2017, Vyas 2019) detailliert untersucht.

Zur Ermöglichung der direkten Ansteuerung der im Use Case relevanten Plattformen durch die im Projekt entworfene Kommunikationsstruktur wurde zusätzlich eine Schnittstelle zum Flottenmanager der Firma Grenzebach entworfen, über welche die einzelnen Plattformen dediziert für Navigationsaufgaben angesprochen werden können.

Arbeitspaket 2.5.1: Analyse und Evaluation von Bahnplanungsansätzen

Mobile funktionale Einheiten können sich frei in der Produktion bewegen und müssen sich folglich in dieser zurechtfinden und ihre Wege planen können, um gewünschte Ziele zu erreichen. Ein Bestandteil der Bahnplanung von mobilen Entitäten ist das Ausnutzen einer geeigneten Umgebungsdarstellung. Hier wurde im Rahmen des Projektes auf eine abgeleitete rasterbasierte Modellierung der Umwelt gesetzt, welche anhand von diskreten Zellen die Belegungswahrscheinlichkeit der Bereiche ausdrückt und sich zur Pfadplanung eignet. Für eine Erklärung hierzu sei an dieser Stelle auf das AP 2.2.3 Umgebungsmodellierung verwiesen.

Im Rahmen dieses AP wurden hinsichtlich der Bahnplanung verschiedene auf Rasterkarten basierende Ansätze umgesetzt und sowohl in der Simulation als auch mittels zweier mobiler Plattformen (siehe Einzeldemonstratoren des LS LIKE, beschrieben innerhalb des TP D) hinsichtlich Funktionsweise getestet. Eine wesentliche Erkenntnis stellte hierbei die an das im Projekt genutzte Framework ROS angelehnte Trennung der Bewegungsplanung der mobilen Plattform in eine globale und lokale Komponente dar. Während die globale Planung auf der derzeit bekannten Umgebungsmodellierung basiert, werden im lokalen Teil der Bahnplanung die Detektionen vorher unbekannter und spontan bei der Plattformnavigation auftretende Hindernisse einbezogen. Drei als besonders geeignet befundene Ansätze wurden anschließend im Detail ausführlicher untersucht und bezüglich der Verwendung verschiedener Parametrisierungen sowie Heuristiken hinsichtlich Planungserfolg, Weglänge und benötigter Planungsdauer evaluiert. Als für die im Use Case vorliegende industrielle Umgebung am geeignetsten befunden wurde hierbei der A*-Ansatz unter Verwendung der Manhattan Distanz (M. Pittner et al. 2018).

Die erzielten Ergebnisse fokussierten die globale Pfadplanung für ausschließlich eine Plattform. Um eine möglichst produktionsoptimale Planung der Pfade mehrerer Plattformen zu ermöglichen, werden zusätzlich Informationen über die Aufenthaltsorte sowie Aufträge der übrigen Plattformen benötigt. Da diese Informationen der einzelnen Plattform nicht vorliegen, wurden die in diesem AP erarbeiteten Ergebnisse an TP 3 weitergegeben. In TP 3 AP 3.3 entstand eine dynamische Planung multipler Plattformen unter Einbezug des Produktionsplanungssystems.

Arbeitspaket 2.5.2: Erweiterte Bahnplanung für Roboterteams

Um die Trajektorienplanung auch bei aus mehreren Plattformen bestehenden Teams verwenden zu können, ist eine Erweiterung der genannten Konzepte notwendig. Da die hierfür benötigten Informationen auf der Plattformebene nicht vorliegen, wird die globale Planung der Trajektorien für multiple Roboter im Teilprojekt 3 unter Einbeziehung der dort vorliegenden Daten hinsichtlich des Produktionsplans und Plattformaufenthaltsorte durchgeführt. Die hierbei freigewordenen Kapazitäten verschoben sich in die für den Use Case relevanteren Bereiche.

Arbeitspaket 2.5.3: Hindernisvermeidung

Auf Basis der aktuell bekannten Umgebungsdarstellung der Plattform kann die Planung eines globalen Pfades gemäß der in AP 2.5.1 untersuchten Ansätze vorgenommen oder im Fall multipler Plattformen von TP 3 bereitgestellt werden und steht somit zur Verfügung. Tritt jedoch der Fall ein, dass zuvor nicht bekannte oder plötzlich im Umfeld der mobilen Plattform auftauchende Objekte zu einer Kollision führen würden, so muss der initial geplante globale Pfad verlassen und entsprechend der sensorischen Erfassung modifiziert werden. Zu diesem Zweck beziehen die lokalen Bahnplanungsmethoden die verfügbaren Sensorinformationen mit in die Planung ein.

Im Rahmen dieses AP wurden zunächst drei im Robotikbereich erfolgreiche Algorithmen zur Hindernisvermeidung hinsichtlich ihrer Reaktionsweise anhand dreier potenziell im Produktionsumfeld auftauchender Szenarien getestet und eingehend analysiert: der Dynamic Window Approach (DWA, Fox et al.), der Elastic Band Approach (EBAND, (Quinlan und Khatib 1993)), und der Timed Elastic Band Approach (TEB, (C. Roesmann et al. 2012)). Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass prinzipiell alle drei Algorithmen erfolgreich zuvor unbekannte statische Objekte kollisionsfrei umfahren können, wobei sich hier DWA und TEB als zuverlässiger erwiesen. Im Fall von auf die Plattform mit moderater Geschwindigkeit zukommenden oder den initial geplanten Fahrtweg kreuzenden Hindernissen zeigen EBAND und TEB vorteilhafte Verhaltensweisen und höhere Robustheit. Hierzu ist jedoch anzumerken, dass keiner der drei Algorithmen eine Prädiktion der Eigen- oder Fremdbewegung umsetzt, sodass nur nach dem Schnappschuss-Prinzip auf Basis der neuesten Messung entschieden wird. Dies kann zu Deadlocks und kritischen Situationen führen, in denen auf Grund der kinematischen Beschränkungen der Plattform eine Kollision nur noch durch Vollbremsung oder nicht mehr vermeidbar ist. Aus diesem Grund wurde eine mögliche Erweiterung solcher Algorithmen unter Einbeziehung einer Prädiktion der Bewegung von Hindernissen erarbeitet.

Dynamische Pfadplanung unter Einbeziehung prädizierter Hindernisbewegungen

Die Planung von Trajektorien für die Navigation mobiler Plattformen kann entscheidend effizienter hinsichtlich benötigter Bremsungen und Fahrtweglänge gestaltet werden, wenn die Bewegung der Objekte in der Umgebung auf geeignete Weise integriert wird. Die hierbei vorliegende Herausforderung ist die Unbekanntheit dieser Informationen, sodass die Bewegungsmuster der dy-

namischen Entitäten auf geeignete Weise geschätzt bzw. präzisiert werden müssen. Hierzu kommen beispielsweise die im Bereich der stochastischen Modellierung bewegter Hindernisse im AP 2.2.4 angesprochene Filtermethoden zum Einsatz.

Im Rahmen dieses AP wurde abschließend untersucht, inwieweit die Einbeziehung präzisierter Hindernisbewegungen einen Vorteil für die Bahnplanung der mobilen Plattformen und die damit verbundene Kollisionsvermeidung darstellt. Zu diesem Zweck wurde ein Ansatz basierend auf der Annahme bereits vorliegender geschätzter Hindernisbewegungen erarbeitet. Durch eine Kombination des zuvor angesprochenen DWA Algorithmus mit stochastischen Monte Carlo Samplingmethoden, konnte ein baumbasierter hierarchischer Pfadplanungsalgorithmus erfolgreich in verschiedenartigen simulierten Szenarien getestet werden. Die Einbeziehung der Bewegungsinformation der Hindernisse führte in allen Testfällen zur erfolgreichen kollisionsfreien Umfahrung sowie Vermeidung von unnötigen Notbremsungen und Reduzierung des Fahrtweges.

Da diese vorausschauende Pfadplanung der mobilen Plattform bei Voranschreiten des dritten Projektjahres aus dem Hauptfokus rückte und in Absprache mit den Industriepartnern für den Use Case die Verwendung der Navigationslösung der Fa. Grenzebach beschlossen wurde, unterblieb eine Umsetzung des Algorithmus auf dem Versuchsträger. Tritt jedoch der Fall ein, dass zuvor nicht bekannte oder plötzlich im Umfeld der mobilen Plattform auftauchende Objekte zu einer Kollision führen, wird die Plattform stillgesetzt und es werden durch Teilprojekt TP 4 bereitgestellte Fehlerbehebungsmaßnahmen auf Basis einer Mensch-Roboter-Interaktion gestartet.

Arbeitspaket 2.5.4: Hochpräzise Positionierung

Zur Interaktion mit der Umgebung ist eine hochpräzise Positionierung der mobilen Plattform wichtig. Im Rahmen dieses AP sollten daher ursprünglich verschiedene Möglichkeiten untersucht werden, wie die Präzision der Positionierung erhöht werden kann. Da sich die Lokalisierung der Plattform unter Absprache mit den beteiligten Industriepartnern im Verlauf des Projektes auf die Software der Fa. Grenzebach gestützt hat und mittels dieser bereits Anwendungsfälle einer Positionierung vor verschiedenen Regalarchitekturen erfolgreich mit der benötigten Genauigkeit umgesetzt wurden, ist dieses AP als obsolet zu betrachten. Die hierbei freigewordenen Kapazitäten der Forschungspartner verschoben sich auf die Erweiterung der Modellierung der Umgebung der Plattform hinsichtlich einer Einbeziehung der für den Use Case relevanten dynamischen Hindernisse wie Menschen und andere Plattformen.

Arbeitspaket 2.6: Kombinierte Trajektorienplanung - Geteilte Umweltmodellierung

Bei der zweiten Zwischenbegutachtung wurde von den Gutachtern angeregt, die Umweltmodellierung noch stärker in den Fokus zu rücken. Aus diesem Grund wurde dieses AP gegenüber dem Antrag in „Geteilte Umweltmodellierung“ umbenannt, um die Ressourcen im dritten Projektjahr für die Weltmodellierung zu nutzen. Die Ergebnisse wurden in enger Kooperation mit der Firma ITQ erarbeitet (Rothmeyer 2019; Roder et al. 2020). Der Ansatz umfasst ein Weltmodell, das über den Stand der Technik hinausgeht, indem es heterogene Umweltwahrnehmungen (z. B. Klassifikation, 2D-Bild, Point-Cloud etc.) unterstützt, für mehrere stationäre oder mobile Nutzer veränderbar macht sowie dynamische und semantische Informationen widerspiegeln kann. Das AP gliedert sich in drei Unterarbeitspakete:

- „AP 2.6:1 Modellierung der Datenstruktur und Datenakquise“ beschreibt die Graphen-basierte Datenmodellierung eines Weltmodells, das geometrische, topologische, semantische

und dynamische Informationen enthält. Ebenfalls werden die Schnittstellen zu Datenquellen in TP 2 aufgezeigt.

- „AP 2.6:2 Verteilung des Weltmodells“ beschreibt die Client-Server-Architektur, um eine verteilte Nutzung und Erweiterung des Weltmodells auf mehreren mobilen Robotern zu ermöglichen.
- „AP 2.6:3 Nutzung des geteilten Weltmodells an Kreuzungen“ greift die ursprünglichen Ideen des Antrags zur Erforschung des Roboterhaltens an Kreuzungen und Fußgängerquerungen auf und zeigt eine mögliche Anwendung der Weltmodellierung zur Sicherheits- und Performanzerhöhung.

Die erzielten Ergebnisse sind im Folgenden im Detail näher erläutert:

Arbeitspaket 2.6:1 Modellierung der Datenstruktur und Datenakquise

Ein Weltmodell kann allgemein wie folgt motiviert werden: die Produktivität von Gruppen kann erhöht werden, wenn die Gruppenmitglieder ihre Wahrnehmung der Umwelt miteinander teilen. Um die vielfältigen Umgebungseinflüsse auf einen Roboter technisch handhabbar zu machen, ist eine Modellierung nötig, welche die Komplexität reduziert. Weiter können die Wahrnehmungen der einzelnen Roboter unterschiedlich sein z. B. durch verschiedenartige Sensoren. Im Rahmen dieses AP wurde zuerst auf die Modellierung einer Datenstruktur eingegangen, welche die verschiedenartigen Informationen aus den vorangegangenen APs in TP 2 widerspiegeln kann.

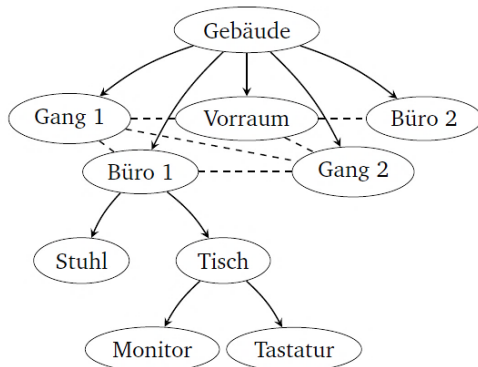


Abbildung 28: Graphen-basierte Datenstruktur mit hierarchischer Anordnung der Objekte zur Beschreibung geometrischer Beziehungen (Pfeillinien) sowie Verbindungen zwischen Objekten einer Hierarchieebene zur Beschreibung von Nachbarschaften (Strichlinien) (Rothmeyer 2019).

Die Datenstruktur ist objektorientiert und graphenbasiert. Graphen eignen sich um Hierarchien und Beziehungen zwischen Objekten abzubilden. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt eine anschauliche Darstellung eines Graphen, der ein Bürogebäude repräsentiert. Hierbei deuten gerichtete Kanten eine hierarchische Beziehung an, welche im Beispiel das Bestehen des Gebäudes aus Räumen oder die Ausstattung von Räumen mit Einrichtungsgegenständen widerspiegelt. Die topologischen Beziehungen deuten hier Nachbarschaft an, z. B. Räume, die durch Türen verbunden sind.

Die hierarchisch-topologische Grundstruktur des Graphen wurde mit einem objektorientierten Ansatz modelliert, vgl. Abbildung 28. Ein Knoten (Node) spiegelt in diesem Zusammenhang Räume oder Objekte wider. Die Kanten (Connections) repräsentieren die gerichteten hierarchischen Beziehungen (VertConnection), bspw. Raum gehört zu Gebäude. Diese können auch eine geometrische Transformation beinhalten, bspw. Lage des Raums im Gebäude. Hierbei sei auch auf die semantische Segmentierung von Räumen mittels Infrastrukturinformationen (AP 2.2.3) verwiesen. Ein Knoten selbst enthält Informationen zu Geometrie, Klassenzugehörigkeit und Dynamik des repräsentierten Objekts.

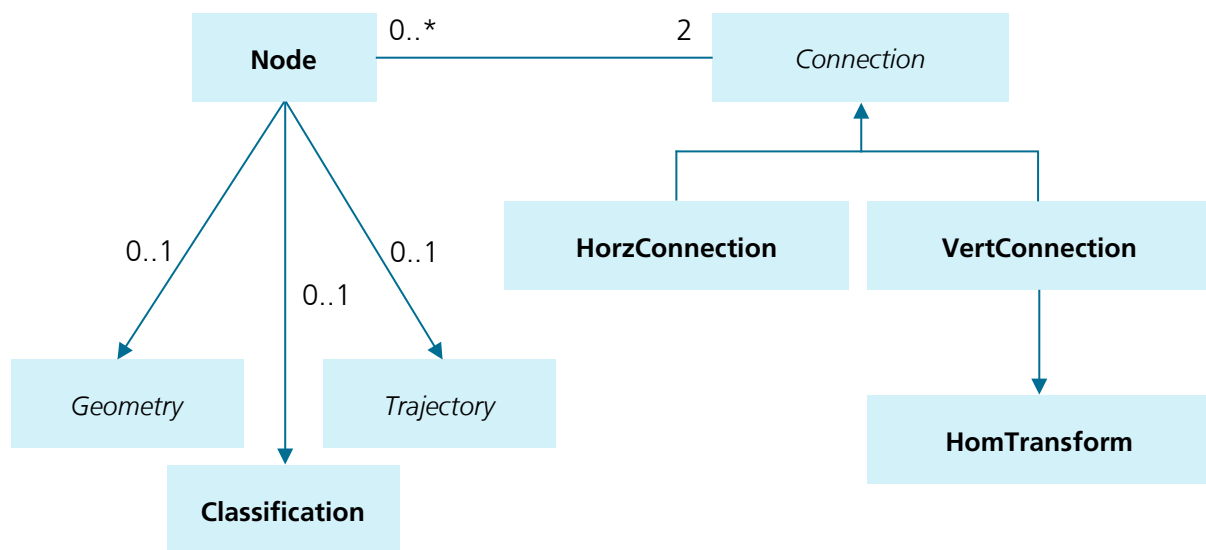


Abbildung 29: Objektorientiertes Klassendiagramm der Datenstruktur. Knoten (Nodes) und Kanten (Connections) bilden die Grundelemente des Graphen (Roder et al. 2020).

In den APs 2.2-2.5. wurden eingehend die Verarbeitung, Interpretation und Fusion von Sensorinformationen aus verschiedenen Domänen behandelt. Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, der die verschiedenen Datenarten in einer einheitlichen Form repräsentierbar macht.

Als Datenarten wurden folgende Gruppen identifiziert:

- Geometrie, welche Körper volumen- oder oberflächenorientiert widerspiegeln
- Klassifikation, welche durch eine semantische Klassifizierung von Objekten entstehen
- Dynamik, welche die vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Bewegungen des Objektes repräsentieren

Unterschiedliche Darstellungen von Objektgeometrie entstehen durch verschiedene Sensorinformationen. So erzeugen 2D-Laserscanner 2D-Punktwolken, welche zu flächigen Belegungskarten (vgl. Occupancy Grid Map) in Form von 2D-Baumstrukturen (Quad Tree) verarbeitet werden können. Äquivalent können 3D-Scanner 3D-Punktwolken aufzeichnen, welche räumliche Belegungskarten als Oktonärbäume (Octree) abbilden. Die Geometrie von bekannten Objekten liegt meist explizit vor, z. B. als CAD-Geometrie im STL-Format. Dabei wird die Oberfläche aus einem Dreiecksnetz approximiert. Abbildung 30 zeigt die repräsentierten Geometrieklassen (Geometry) des Weltmodells, welche allgemein einsetzbar für die im Rahmen von FORobotics vorkommenden Geometrieinformationen sind.

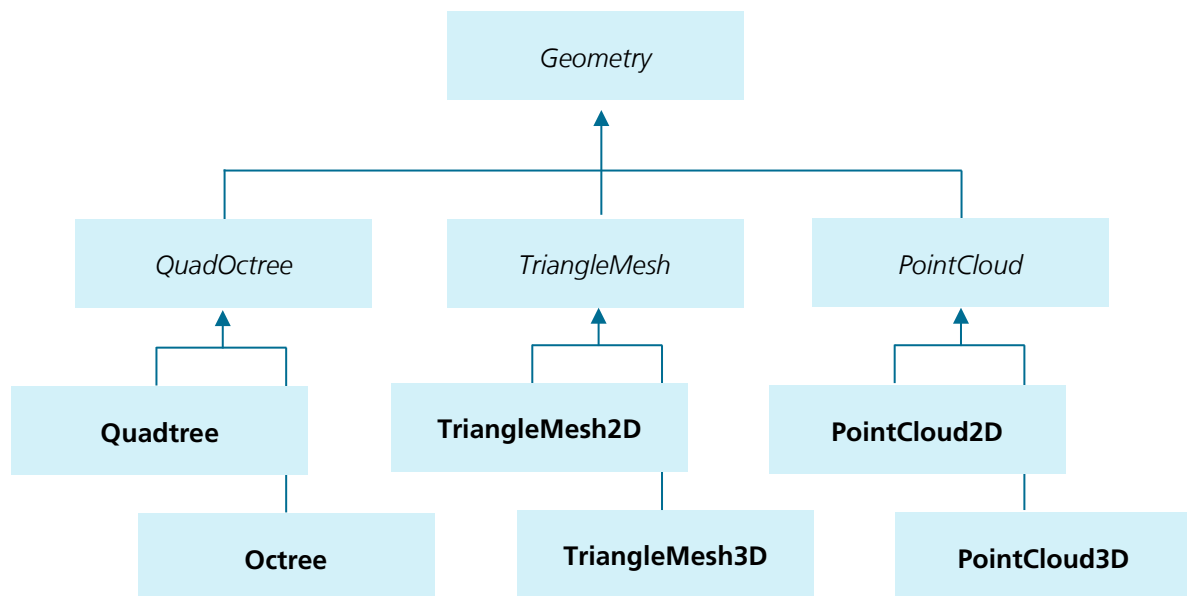


Abbildung 30: Die Klasse „Geometry“ ist eine Schnittstelle zu verschiedenen Arten der Geometriedarstellung aufgrund verschiedener Sensortypen (Rothmeyer 2019).

Weiter behandelt AP 2.2 schwerpunktmäßig die semantische Sensordatenanalyse, bspw. für Objekt- und Menschenerkennung. Über Klassifizierungsalgorithmen können Objekte anhand verschiedener Sensorwahrnehmungen bestimmten Klassen zugeordnet oder Menschen erkannt werden. Da Mehrfachzugehörigkeit zu Objektklassen möglich ist (z. B. Stuhl und Bürogegenstand) oder ein eindeutiges Ergebnis nicht bestimmt werden konnte (z. B. Stuhl zu 80 % oder Papierkorb zu 20 %), unterstützt die Klassifikationsklasse (Classification) Mehrfachzuordnungen zu Objektklassen mit Übereinstimmungswerten.

Objekte unterscheiden sich neben ihrer geometrischen Oberfläche und Klassenzugehörigkeit durch Ihre Dynamik. Sie können statisch (Wände), dynamisch (Menschen und mobile Roboter) oder quasistatisch (ortsflexible, jedoch nicht selbstbewegt) sein. Diese Informationen sind nützlich, um bspw. Staus in engen Gassen zu umfahren oder eine Gefährdung durch sich annähernde dynamische Objekte zu vermeiden. In AP 2.2.4 wurden Objektdynamiken und das Tracking von Objekten behandelt und in AP 2.5.3 für eine dynamische Bahnplanung unter prädizierten Hindernisbewegung genutzt. Zur weiteren Modellierung wurde die Trajektorienklasse (Trajectory) eingeführt. Sie enthält momentane und vergangene Geschwindigkeiten als ein Zeitstempel-Wert-Paar. Diese Geschwindigkeitswerte können entweder durch den Roboter selbst gemessen (Eigenbewegung) oder durch Tracking eines anderen Objektes beobachtet werden. Weiter unterstützt die Klasse zukünftige Objektdynamiken. Geplante Trajektorien (Eigenbewegung) liegen präzise vor und werden als Spline modelliert. Die Bewegung anderer Objekte muss prädiziert werden. Die Prädiktion wird Sample-basiert als Zeitstempel-Wert-Unsicherheit-Tripel modelliert, wobei die Unsicherheit als Kovarianzmatrix abgebildet wird.

Arbeitspaket 2.6:2 Verteilung des Weltmodells

Das Weltmodell ist für ein Mehr-Benutzer-Szenario ausgelegt. Das Teilen der Umgebungswahrnehmung unter den mobilen Robotern kann Sicherheits- und Performanzsteigerungen ermöglichen. Technisch wird dies über einen Client-Server-Ansatz realisiert. Ein zentraler Server hält das

vollständige Weltmodell. Abbildung 31: Client-Server-Architektur mit zentralem Server und daran sternförmig angeschlossenen Clients (Roder et al. 2020). zeigt einen exemplarischen Aufbau, in dem drei mobile Roboter, eine ortsfeste Kamera (vgl. Infrastrukturkamera), ein grafisches Visualisierungsgerät und eine Datenbank abgebildet sind.

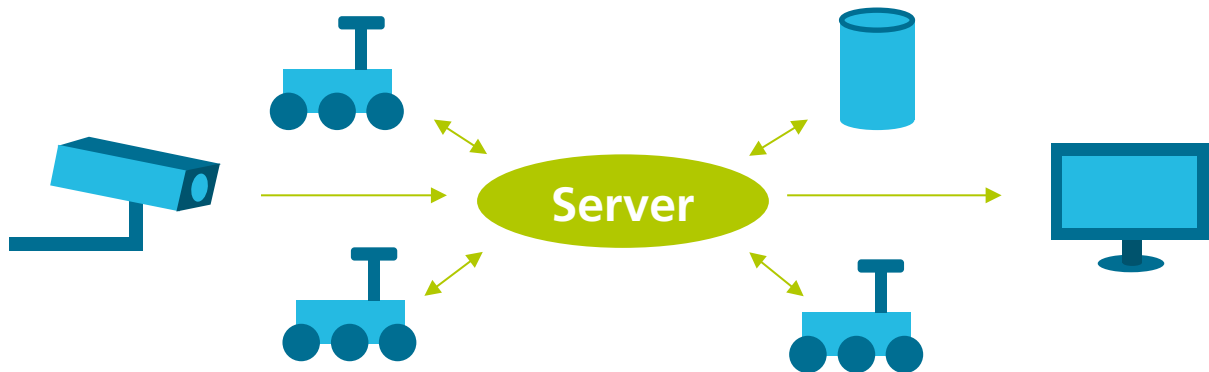


Abbildung 31: Client-Server-Architektur mit zentralem Server und daran sternförmig angeschlossenen Clients (Roder et al. 2020).

Mobile oder ortsfeste Roboter (vgl. Infrastrukturkameras AP 2.3.2) beziehen vom Server für sie relevante Kartenausschnitte. Dadurch werden die Speicherbelastung der Roboter und die Netzwerkauslastung geringgehalten. Clients können geometrische Objekte in die Karte einfügen, die Lage von Objekten ändern, Trajektorien zu Objekten hinzufügen oder Attribute von Objekten verändern. Der Server benachrichtigt die weiteren Clients über die Änderung des Weltmodells, falls es ihren Kartenausschnitt betrifft. Ebenfalls bereinigt er Konflikte in der Karte, wie Objektdoppelungen oder verwaltet die Zugriffsrechte für Objektänderungen.

Im Rahmen des dritten Projektjahres wurde ein Softwaredemonstrator für die Client-Server-Architektur implementiert. Die Netzwerkkommunikation basiert auf TCP/IP. Der Kartenserver und die Client-Schnittstellen wurden für Linux-Betriebssysteme in C/C++ entwickelt, sowie eine Client-Schnittstelle für ROS-Nodes.

Abbildung 32 zeigt die Klassenhierarchie der verschiedenen Nutzerschnittstellen. Das Weltmodell selbst wird vom Server in einer MySQL-Datenbank persistiert.

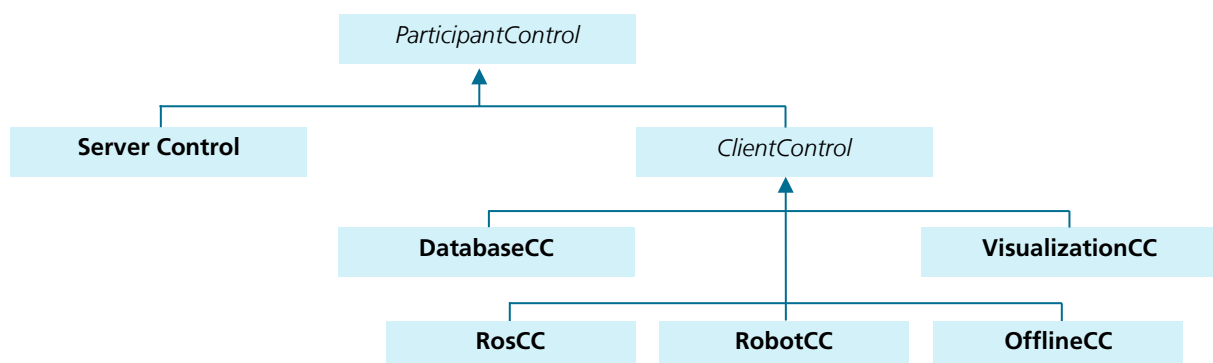


Abbildung 32: Klassenstruktur der Client- und Serverschnittstellen. Es werden die Client-Typen aus Abbildung 31 unterstützt (Rothmeyer 2019).

Arbeitspaket 2.6:3 Nutzung des geteilten Weltmodells an Kreuzungen

Im Antrag sollten ursprünglich als AP 2.6.2 und 2.6.3 das „Verhalten an Fußgängerüberwegen und beim Überholen von Fußgängern“ sowie das „Verhalten an Kreuzungen“ erforscht werden. Die Akzeptanz von Maschinen durch Menschen wird unter anderem dadurch gewährleistet, dass Menschen die Aktionen der Maschine verstehen und zum Teil vorhersehen können. Das erfolgt nicht nur durch Signale, z. B. „mobile Plattform stoppt“, sondern auch durch die Wahrnehmung des Vorhabens wie beispielsweise einer Geschwindigkeitsreduzierung. An dieser Stelle sei auf die ausführlichen Studien in den Teilprojekten 4 und 5 zur Interaktion zwischen Robotern und Menschen, sowie den entsprechenden Reaktionen von Menschen auf verschiedenartige Verhaltensweisen des Roboters hingewiesen.

Zur Vermeidung von thematischen Überschneidungen im Rahmen des Projektes und auf Anregung der Begutachter, fokussiert sich Teilprojekt 2 auf die Umgebungsmodellierung und Detektion sowie Einschätzung bewegter Hindernisse.

Dem ursprünglichen Antrag folgend, wurde für das oben entwickelte Weltmodell in diesem Teilarbeitspaket ein Teildemonstrator aufgebaut, um das Potential eines geteilten Weltmodells für Kreuzungsszenarien mit Fußgängern aufzuzeigen. Abbildung 33 (Links) zeigt das Szenario in der Draufsicht. Ein mobiler Roboter und ein Mensch nähern sich einer schwer einsehbaren Kreuzung. Ein zweiter Roboter kann den Menschen beobachten, dessen Trajektorie prädictieren und in das Weltmodell einpflegen. Der erste Roboter kann so frühzeitig auf die prädictierte Trajektorie reagieren. Abbildung 33 (mitte & rechts) zeigt den Versuchsaufbau in der Realität und die Visualisierung des Weltmodells. So kann auch gezeigt werden, dass stationäre Infrastrukturkameras an Gefahrenpunkten wie Kreuzungen in Kombination mit einem geteilten Weltmodell einen zusätzlichen Sicherheitsgewinn bieten. (Rothmeyer 2019; Roder et al. 2020)

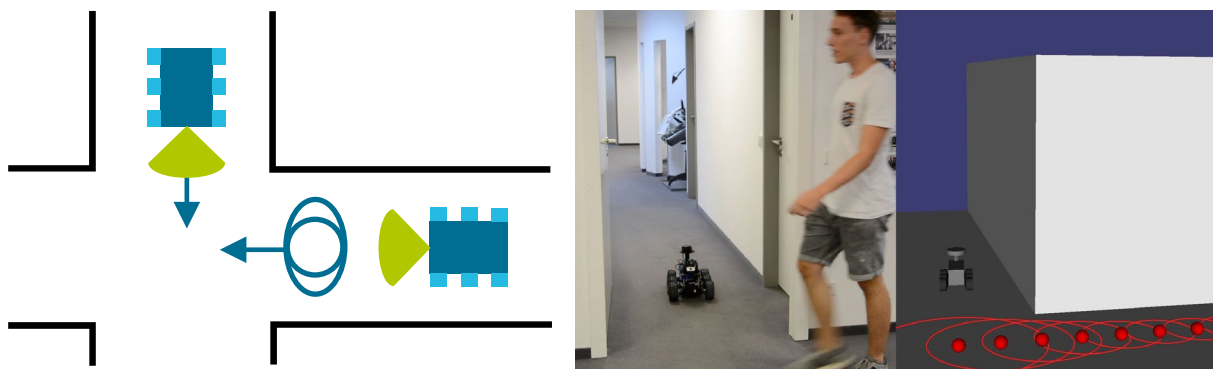


Abbildung 33: Links: Testszenario in der Draufsicht. Mitte: Reales Testszenario im Kreuzungsbereich. Rechts: Digitaler Zwilling im Weltmodell (Roder et al. 2020).

4.2.4 Kooperation mit anderen Teilprojekten

Kooperation mit Teilprojekt 1 und 3:

Innerhalb des Forschungsprojekts wurde ein aufgabenorientierter Ansatz zur Planung und Programmierung der Ressourcen gewählt. Hierbei ist eine ganzheitliche Sichtweise von der Produktionsplanung und -steuerung bis hin zur Feldebene entscheidend. Aus diesem Grund fand ein enger Austausch in regelmäßigen Abständen mit TP 1 und TP 3 statt. Die Zusammenarbeit bezog sich hierbei maßgeblich auf folgende Themen:

- Entwicklung der Modellhierarchie zur Beschreibung von Aufgaben und Fähigkeiten
- Konzeption der ROS-Architektur des Roboters
- Analyse der Anwendungsfälle und Ableitung der benötigten Fähigkeiten zur Ausführung von Aufgaben im Bereich Kommissionierung und Montage
- Implementierung von Fähigkeiten zur Realisierung benötigter Funktionalitäten
- Zusammenspiel zwischen Aufgaben-Management auf Roboter- und PPS-Ebene
- Kommunikations- und Verarbeitungsarchitektur und Datenaustausch zwischen den Systemen

Kooperation mit Teilprojekt 4:

Seit Projektbeginn erfolgt ein intensiver interdisziplinärer Austausch sowie gemeinschaftliche Entwicklungen innerhalb des Verbundes. Dies erstreckt sich von gemeinsamen Entwicklungen im Bereich der sensorbasierten Menscherkennung, über die Gestaltung von Werker-Feedbackansätzen der entstehenden Funktionsmuster und Demonstrator-Lösungen als Rück-Kanal an den Menschen bis hin zur gemeinsamen Erweiterung der für die Mensch-Roboter-Interaktion erforderlichen Kommunikations- und Verarbeitungsarchitekturen. TP 4 greift dabei maßgeblich auf die von TP 2 zur Verfügung gestellten Dienste und Fähigkeiten zurück. Hierzu zählen Funktionen zur Multi-Roboterprogrammierung ebenso wie solche zur Teleoperation. Ab dem dritten Projektjahr wurde bspw. gemeinsam mit TP 4 zum einen die Geschwindigkeitsvektoren-basierte Teleoperationssteuerung der Yaskawa-Roboter entwickelt sowie zum anderen die Integration von Objekterkennungs- und 6DoF-Poseschätzungsalgorithmen in das Augmented Reality Umgebungsmodellierungssystem zur Teleoperation und Fernintervention durchgeführt.

Kooperation mit Teilprojekt 5:

Die in den Analysen des Teilprojekts 5 erlangten Erkenntnisse stellen eine wertvolle Grundlage für die in TP 2 adressierte Plattformabsicherung sowie für die in TP 2 untersuchte lokale Plattform- und Manipulatorbewegungsplanung dar. Ergebnisse des TP 5 aus theoretischen Überlegungen, Literatur-Reviews und durchgeführter Laborstudien zu Distanzen bei der lokalen Bahnplanung finden in den entsprechenden TP 2 Inhalten Berücksichtigung.

Kooperation mit Teilprojekt D:

Zwischen den TP D und TP 2 erfolgte seit Projektbeginn eine intensive und regelmäßige Zusammenarbeit. TP 2 stellte die autonomen Fähigkeiten der eingesetzten mobilen Roboter und Manipulatoren sowie die hierfür erforderliche sensorische Wahrnehmung, Sensordatenfusion, Interpretation der Sensordaten und die Umweltmodellierung zur Verfügung. Ebenso die notwendige lokale Bewegungsplanung der mobilen Plattform und der integrierten Manipulatoren. In Zusammenarbeit zwischen TP 2 und TP D wurden Absicherungskonzepte entwickelt, evaluiert und in

den Gesamtdemonstrator integriert. TP 2 erschloss zudem die Kommunikations- und Verarbeitungsarchitektur (Vernetzung) der Systementitäten des Gesamtdemonstrators. Die in TP 2 beteiligten Partner sind ebenso Mitarbeiter von TP D.

4.2.5 Veröffentlichungen

Folgende Veröffentlichungen sind im Rahmen des Teilprojekt TP 2 entstanden:

- Blank, A.; Hiller, M. et al.: 6DoF Pose-Estimation Pipeline for Texture-less Industrial Components in Bin Picking Applications, in IEEE 9th European Conference on Mobile Robots (ECMR), 2019.
- Hammerstingl, V.; Lux, G.; Reinhart, G.: Produktion als Mannschaftssport. Forschungsvorhaben FORobotics: Mehr erreichen im Team. Handling (2016)
- Heuss, L.; Blank, A. et al. (2019): Modular Robot Software Framework for the Intelligent and Flexible Composition of Its Skills. In: Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future. APMS 2019, Austin, TX, USA, September 1-5, 2019, Proceedings, Part I, Bd. 566. Cham: Springer International Publishing, S. 248–256.
- Heuss, L.; Lux-Gruenberg, G.; Hammerstingl, V.; Schnös, F.; Rinck, P.; Reinhart, G.; Zäh, M.: Autonome mobile Roboter in der Smart Factory – Dynamische Planung und Adaption mobiler Roboter für die flexible Produktion. Wt Werkstattstechnik online 108 (2018) 9, S. 574-579
- Heuss, L.; Roder, S.: Mobile ad-hoc kooperierende Roboterteams in der Fabrik der Zukunft. Handling (2018)
- Hiller, M. et al.: Incorporating Building Information to Globalize and Robustify Grid-based Indoor SLAM. International Conference on Control, Automation and Systems (2017)
- Hiller, M. et al.: Learning Topometric Semantic Maps from Occupancy Grids. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS (2019)
- Hiller, M. et al.: World Modeling for Mobile Platforms Using a Contextual Object-Based Representation of the Environment. IEEE International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems CYBER (2018)
- Kharboutli, A.; Hiller, M. et al.: Efficient Localization Using Radio-Based Sensors and Odometry. IEEE International Conference on Robotic Computing IRC (2019)
- Metzner, M.; Blank, A et al.: Virtual Commissioning of 6DoF Pose-Estimation and Robotic Bin Picking Systems for Industrial Parts, in IFAC-Papers 52 (2019), S. 160-164, ISSN: 2405-8963
- Pittner, M.; Hiller, M. et al.: Systematic Analysis of Global and Local Planners for Optimal Trajectory Planning. 50th International Symposium on Robotics (2018)
- Roder, S.Q. et al. (2020) Development of a Shared Environment Model with Dynamic Trajectory Representation for Multiple Mobile Robots. In: Schüppstuhl T., Tracht K., Henrich D. (eds) Tagungsband des 5. Kongresses MHI. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg
- Zäh, M., Rinck, P., Blank, A., Schnös, F.: FORobotics: Mehr erreichen im Team. Handling (2017)

4.2.6 Literaturverzeichnis

Albrecht, Felix (2018): Konzeptentwicklung und Demonstratoraufbau für das robotergestützte Kommissionieren von Kleinteilen aus Regalen und Kleinladungsträgern mit Hilfe von ROS. Projektarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Aldoma, Aitor; Faulhammer, Thomas; Vincze, Markus (2014): Automation of "ground truth" annotation for multi-view RGB-D object instance recognition datasets. In: 2014 IEEE/RSJ International

Conference on Intelligent Robots and Systems. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014). Chicago, IL, USA: IEEE, S. 5016–5023.

Blank, Andreas; Hiller, Markus; Zhang, Siyi; Leser, Alexander; Metzner, Maximilian; Lieret, Markus et al. (2019): 6DoF Pose-Estimation Pipeline for Texture-less Industrial Components in Bin Picking Applications. In: 2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR). 2019 European Conference on Mobile Robots (ECMR). Prague, Czech Republic: IEEE, S. 1–7.

Roesmann, Christoph; Feiten, Wendelin; Woesch, Thomas; Hoffmann, Frank; Bertram, Thorsten (2012): Trajectory modification considering dynamic constraints of autonomous robots. In: ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics, S. 1–6.

Endres, Stefan (2018): Untersuchung und sicherheitskritische Bewertung radarbasierter Sensorik zur MRK-Absicherung eines Knickarmroboters. Bachelorarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Fichtner, Mathias (2019): Fusion von Laser- und Kameradaten zur kombinierten Objektdetektion. Forschungspraktikum. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Informationstechnik (Kommunikationselektronik).

Förg, Manuel (2017): Entwicklung einer Kommunikationsschnittstelle zwischen ROS und OPC UA zur industrieconformen Datenübertragung in der Robotik. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Frank, Anton (2019): Integration elementarer Fähigkeiten in eine bestehende Bin Picking Architektur und Untersuchung einer hardwareunabhängigen Aufgabenerfüllung. Bachelorarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Geisler, Felix (2018): Entwicklung und Evaluation eines Fuzzy-Klassifikators auf Basis von Ultraschallsensorik zur Menscherkennung und -Ortung. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Heuss, Lisa; Blank, Andreas; Dengler, Sebastian; Zikeli, Georg Lukas; Reinhart, Gunther; Franke, Jörg (2019): Modular Robot Software Framework for the Intelligent and Flexible Composition of Its Skills. In: Farhad Ameri, Kathryn E. Steckel, Gregor von Cieminski und Dimitris Kiritsis (Hg.): Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future, Bd. 566. Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 248–256.

Heuss, Lisa; Lux-Gruenberg, Gregor; Hammerstingl, Veit; Schnös, Florian; Rinck, Philipp; Reinhart, Gunther; Zäh, Michael (2018): Mobile Autonome Roboter in der Smart Factory: Dynamische Planung und Adaption mobiler Roboter für die flexible Produktion. In: wt Werkstattstechnik online 108 (9).

Hiller, Markus; Particke, Florian; Hofmann, Christian; Bey, Henrik; Thielecke, Jörn (2018): World Modeling for Mobile Platforms Using a Contextual Object-Based Representation of the Environment. In: 2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). 2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Tianjin, China: IEEE, S. 187–191.

Hinterstoisser, Stefan; Lepetit, Vincent; Ilic, Slobodan; Holzer, Stefan; Bradski, Gary; Konolige, Kurt; Navab, Nassir (2013): Model Based Training, Detection and Pose Estimation of Texture-Less 3D Objects in Heavily Cluttered Scenes. In: David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M. Kleinberg, Friedemann Mattern, John C. Mitchell et al. (Hg.): Computer Vision – ACCV 2012, Bd. 7724. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), S. 548–562.

Hodaň, Tomáš; Michel, Frank; Brachmann, Eric; Kehl, Wadim; Buch, Anders Glent; Kraft, Dirk et al. (2018): BOP: Benchmark for 6D Object Pose Estimation. In: Vittorio Ferrari, Martial Hebert, Cristian Sminchisescu und Yair Weiss (Hg.): Computer Vision – ECCV 2018, Bd. 11214. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Computer Science), S. 19–35.

Hofmann, Christian (2018): Detektion, Lokalisierung und Klassifikation von Objekten mithilfe von Hintergrundsubtraktion und Deep Learning in einem Mehrkamerasystem. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Informationstechnik (Kommunikationselektronik).

Hummel, Lukas (2018): Untersuchung und Bewertung von RADAR-Sensorik im Bereich der Absicherung mobiler Robotersysteme in der Produktionsumgebung. Bachelorarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Kharboutli, Ahmad Amin; Hiller, Markus; Particke, Florian; Nowak, Thorsten; Thielecke, Jorn; Hartmann, Markus (2019): Efficient Localization Using Radio-Based Sensors and Odometry. In: 2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC). 2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC). Naples, Italy: IEEE, S. 240–245.

Kharboutli, A. Amin (2018): Fusion von Funk und Robotersensorik zur Lokalisierung einer mobilen Plattform. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Informationstechnik (Kommunikationselektronik).

Leser, Alexander (2019): Entwicklung und Umsetzung einer robotergestützten Kommissionierung von Maschinenelementen mit dem Fokus auf KI-gestützter Objektklassifikation und Posebestimmung. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Lieret, Markus (2017): Konzeptentwicklung und prototypische Umsetzung einer universell einsetzbaren Verarbeitungsarchitektur zur Umgebungsüberwachung von Industrierobotern. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Lin, Tsung-Yi; Maire, Michael; Belongie, Serge; Hays, James; Perona, Pietro; Ramanan, Deva et al. (2014): Microsoft COCO: Common Objects in Context. In: David Fleet, Tomas Pajdla, Bernt Schiele und Tinne Tuytelaars (Hg.): Computer Vision - ECCV 2014. Cham: Springer International Publishing, S. 740–755.

Mattejat, David (2018): Aufbau und Evaluation eines sensorgestützten Saug-Greifsystems für das Bin-Picking im Kontext mobiler Robotersysteme. Projektarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Morrison, Douglas; Leitner, Juxi; Corke, Peter (2018): Closing the Loop for Robotic Grasping: A Real-time, Generative Grasp Synthesis Approach. In: Robotics: Science and Systems XIV. Robotics: Science and Systems 2018, June 26-3, 2018: Robotics: Science and Systems Foundation.

Neubauer, Marco (2018): Entwicklung, Umsetzung und Evaluation einer Sensornachführung zur fortwährenden Absicherung eines Knickarmroboters. Bachelorarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Pittner, Maximilian (2017): Trajektorienplanung bei autonomen Robotern. Bachelorarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Informationstechnik (Kommunikationselektronik).

Pittner, Maximilian; Hiller, Markus; Particke, Florian; Patino-Studencki, Lucila; Thielecke, Jörn (2018): Systematic Analysis of Global and Local Planners for Optimal Trajectory Planning. In: ISR 2018; 50th International Symposium on Robotics, S. 1–4.

Prossel, Dominik (2018): Klassifikation von Objekten mittels eines 2D-Laserscanners. Bachelorarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Informationstechnik (Kommunikationselektronik).

Pfeuffer, Christian (2018): Fusion von Laser- und Tiefendaten zur robusten Objekterkennung und Kartenerstellung. Forschungspraktikum. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Informationstechnik (Kommunikationselektronik).

Pfeuffer, Christian (2018): Positionsschätzung und Geometriebestimmung von Objekten mittels eines mobilen Roboters. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Informationstechnik (Kommunikationselektronik).

Qi, Charles R.; Liu, Wei; Wu, Chenxia; Su, Hao; Guibas, Leonidas J. (2018): Frustum PointNets for 3D Object Detection from RGB-D Data. In: 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Salt Lake City, UT, USA: IEEE, S. 918–927.

Qiu, Chen (2018): Detection and Classification of Objects in Occupancy Grid Maps. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Informationstechnik (Kommunikationselektronik).

Quinlan, Sean; Khatib, Oussama (1993): Elastic bands: connecting path planning and control. In: [1993] Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation. [1993] IEEE International Conference on Robotics and Automation. Atlanta, GA, USA, 2-6 May 1993: IEEE Comput. Soc. Press, S. 802–807.

Redmon, Joseph; Farhadi, Ali (2018): YOLOv3: An Incremental Improvement. *Technical Report, CoRR*.

Roder, Sebastian Quirin; Rothmeyer, Florian; Spiegelberger, Bernd; Reinhart, Gunther (2020): Development of a Shared Environment Model with Dynamic Trajectory Representation for Multiple Mobile Robots. In: Thorsten Schüppstuhl, Kirsten Tracht und Dominik Henrich (Hg.): Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 45–55.

Rothmeyer, Florian (2019): Entwicklung eines gemeinsamen Umweltmodells mit dynamischer Aktualisierung für mehrere mobile Roboter. Development of a Shared Environment Model with Dynamic Updating for Multiple Mobile Robots. Masterarbeit. Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

Schmitt, Marcus (2017): Entwicklung eines adaptierbaren mechatronischen Systems zur fortwährenden Absicherung des Roboterarbeitsraums mittels automatisierter Nachführung der eingesetzten Sensorik. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Schneider, Sven (2018): Entwicklung und Evaluation einer Menscherkennung basierend auf PIR- sowie Ultraschall-Sensoren im Umfeld mobiler Roboter. Bachelorarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Tekin, Bugra; Sinha, Sudipta N.; Fua, Pascal (2018): Real-Time Seamless Single Shot 6D Object Pose Prediction. In: 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Salt Lake City, UT, USA: IEEE, S. 292–301.

Vyas, Shivang (2019): Path Planning and Avoidance of Dynamic Obstacles. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Informationstechnik (Kommunikationselektronik).

Zikeli, Lukas (2018): Konzeption und Implementierung einer objektorientierten, modularen Architektur zur Bereitstellung elementarer Fähigkeiten basierend auf ROS-Actions am Beispiel Bin-Picking. Bachelorarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen. Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

4.3 TEILPROJEKT 3 - AUFGABENORIENTIERTE PLANUNG

Michaela Krä, Ludwig Vogt, Christian Härdtlein, Lisa Heuss, Sebastian Roder, Johannes Schilp

4.3.1 Allgemeine Angaben

Beteiligte Industriepartner:

- MAN Truck & Bus AG
- Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG
- SALT Solutions AG
- Software Factory GmbH
- software4production GmbH
- Yaskawa Europe GmbH, Robotics Division

Projektleitung:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp, Lehrstuhl für Produktionsinformatik, Universität Augsburg

4.3.2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Im Teilprojekt 3 wird die Planung und Steuerung der intelligent vernetzten und mobilen Produktionsressourcen adressiert. Das Ziel besteht in der mengen-, termin- und kapazitätsgerechten Planung und Steuerung des Produktionsablaufs.

Im ersten Projektjahr wurden die Grundlagen für die Entwicklung einer Planungssystematik erarbeitet, welche die Auftragsabwicklung mit der durch die Ressourcenmobilität entstehenden Dynamik optimiert. Mit den Partnerunternehmen wurden zu Beginn die aktuellen Möglichkeiten von PPS-Systemen und deren angrenzenden Softwarebausteinen diskutiert. Es wurde deutlich, dass im Bereich der Planung einer Produktion unter Einbeziehung mobiler Ressourcen zunächst einige grundlegende Abstimmungen zum Konzept nötig sind. Der Planungs- und Steuerungsablauf geht über PPS-Systeme nach heutigem Stand hinaus. Die Betrachtungen beginnen bereits bei Auftrags-eingang und der Vorbereitung des Auftrags auf die automatische Verplanung, die entsprechend der „neuen“ Flexibilität angepasst werden muss. Abbildung 34 zeigt vereinfacht die Zusammenhänge zwischen Produktionsplanung, aufgabenorientierter Programmierung und Produktionssteuerung, die die Grundlage für die aufgabenorientierte Planung darstellen und auf die in der nachfolgenden Beschreibung der Ergebnisse eingegangen wird. Außerdem sind die Arbeitspakete dargestellt, in die das Teilprojekt aufgeteilt wurde.

Im zweiten Projektjahr wurden die bereits erarbeiteten Inhalte erweitert und in Teilen prototypisch implementiert. Der Fokus lag auf den Methoden zur aufgabenorientierten Programmierung, zur dynamischen Planung mit globaler Bahnplanung und zur flexiblen Steuerung. Betrachtete Aspekte und Teilsysteme waren in diesem Zusammenhang die Auftragseingabe mit -einlastung ohne Betrachtung von Teams, ein erster Ansatz zur aufgabenorientierten Programmierung, die Auswahl einer geeigneten Methode zur globalen Bahnplanung sowie erste Betrachtungen zu horizontaler und vertikaler Vernetzung.

Im dritten Projektjahr war das Ziel das Zusammenführen der bisher erarbeiteten Inhalte zu einem Gesamtsystem, das einzeln und im Gesamtdemonstrator evaluiert werden kann, sowie die Erarbeitung von Teilsystemen, die isoliert Teilaspekte adressieren. Außerdem stand die Übertragung

der bisherigen Ergebnisse auf Teams aus mehreren unterschiedlichen Ressourcen und die Befähigung der Planungs- und Steuerungsumgebung im Zentrum.

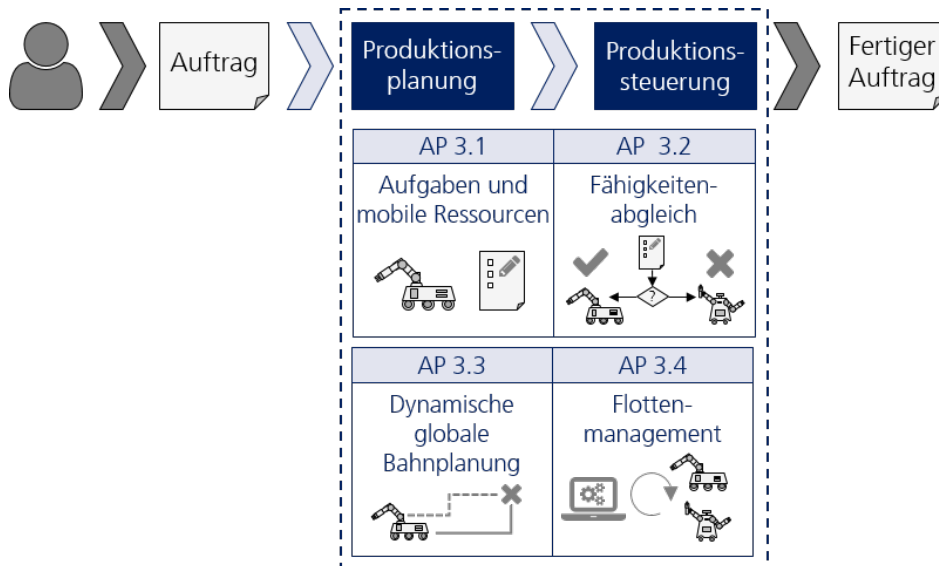


Abbildung 34: Gesamtkonzept aufgabenorientierte Planung

4.3.3 Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss

Nachfolgend sind die Ergebnisse und Erkenntnisse beschrieben, die in den Arbeitspaketen im Rahmen des Projekts erzielt wurden, wobei der Fokus auf denen des dritten Projektjahres liegt.

Arbeitspaket 3.1: Abbildung von Aufgaben und mobilen Ressourcen im dynamischen Umfeld

Im ersten Arbeitspaket des Teilprojekts 3 wurden die Grundlagen für die Erarbeitung und Umsetzung einer aufgabenorientierten Planung erarbeitet. Im Rahmen des Forschungsprojekts werden mobile Roboter und Menschen alleine oder im Team in unterschiedlichen Anwendungsszenarien eingesetzt. Bedingt durch neue Herausforderungen, wie der Einsatz von mobilen Robotern in dynamischen und unstrukturierten Umgebungen oder der Forderung, dass mobile Roboter variierende Produktionsaufgaben übernehmen können, wurde innerhalb des Projekts ein aufgabenorientierter Ansatz zur Planung und Programmierung der Roboter gewählt. Grundlage dafür ist die einheitliche, abstrakte Beschreibung von Aufgaben und Ressourcen, die in AP 3.1 betrachtet wird.

Arbeitspaket 3.1.1: Analyse Ist-Zustand und Anforderungen

Das Ziel der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) - als das Kernstück jedes produzierenden Unternehmens - ist es, den Auftrag so durch die Produktion zu führen, dass dieser möglichst schnell den Wertschöpfungsprozess durchlaufen kann. Die Hauptaufgabe besteht darin, unter Berücksichtigung von Effizienz und Wirtschaftlichkeit sowie vor dem Hintergrund von Abhängigkeiten, die geforderten Zielgrößen für eine Produktion zu erreichen.

An erster Stelle der operativen Planungsebene eines Produktionsprozesses steht die geplante Soll-Vorgabe für die Produktionssteuerung. Als Teil der Produktionssteuerung erfolgt daraufhin die

Umsetzung des Terminplans, der zur Aufgabe hat, Produktionsaufträge mengen- und terminmäßig den dazu benötigten Ressourcen zuzuordnen und eine zeitliche Reihenfolge für die Abarbeitung festzulegen. Aufgrund der Eigenschaften einer modernen Produktion kommt es auch zu gesteigerten Anforderungen an die Auftragsabwicklung der PPS. Neben den Grundvoraussetzungen, wie Flexibilität und kontinuierliche Anpassungsfähigkeit, ist besonders eine Steigerung des Komplexitätsgrads im Bereich der Koordination und Planung von Aufträgen für Produktionsabläufe zu vermerken. Dies steht im Zusammenhang mit der geplanten Integration der kurzfristigen und situationsabhängigen Zusammenstellung von Teams, des dynamischen Umgangs mit Rückmeldungen der Ressourcen sowie einer Erhöhung der Flexibilität bezüglich Aufgaben- und Ressourcenbeschreibung, was aktuell durch gängige Planungs- und Steuerungssysteme nicht abgebildet werden kann. Die genaue Analyse findet sich im ersten Zwischenbericht.

Den aus dem IST-Zustand in Projektjahr 1 abgeleiteten Anforderungen kann mit einer Weiterentwicklung hin zu einer dynamischen PPS begegnet werden. In Projektjahr 2 und 3 wurden die betrachteten Einflussfaktoren in der Modellierung von Aufgaben und Ressourcen berücksichtigt.

Arbeitspaket 3.1.2: Modellierung der Aufgabe

Im zweiten Projektjahr wurde die Modellhierarchie zur Beschreibung von Aufgaben erarbeitet und auf dieser Basis die zur Bearbeitung der unterschiedlichen Jobs durchzuführenden Abläufe beschrieben. Die Modellhierarchie erweitert die Fähigkeiten-Taxonomie von Hammerstingl und Reinhart (2016) und wurde von Heuss et al. (2018)

veröffentlicht. Die vorgestellte Modellhierarchie untergliedert hierbei in Jobs, Aufgaben und Prozessschritte. Jobs werden durch sog. Aufgaben und untergeordnete Prozessschritte beschrieben. Die Kombination und Verschaltung dieser ermöglicht in Summe die Beschreibung komplexer Produktionsaufgaben über mehrere Abstraktionsebenen hinweg. Aufgaben und Prozessschritte werden zudem semantisch analog zu den Betriebsmittelfähigkeiten beschrieben werden (siehe auch TP1 und TP2 für die Modellierung der Fähigkeiten). Innerhalb der Produktionsplanung kann so ein eingangs abstrakter Job stufenweise untergliedert, in eine detaillierte Aufgabenbeschreibung überführt

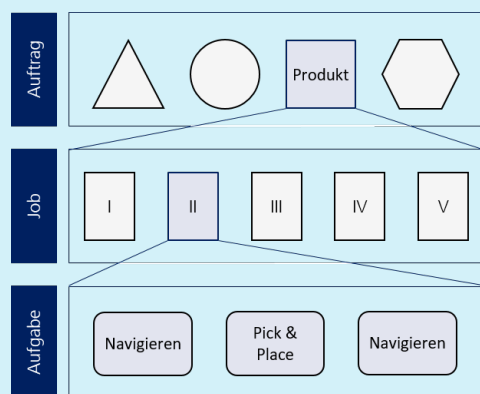


Abbildung 35: Untergliederung Auftrag-Job-Aufgabe

und einem geeigneten mobilen Roboter zugewiesen werden. (vgl. zweiter Zwischenbericht und Heuss et al. (2018))

Innerhalb des dritten Projektjahres wurde das Aufgaben-Modell um Aufträge erweitert. Im Rahmen dieses Kapitels werden die Arbeiten des dritten Projektjahrs mit Bezug auf die Arbeiten der vorherigen Projektjahre zum Aufgaben-Modell beschrieben.

Die Grundlage der dargestellten Modellhierarchie bildet der *Auftrag*, welcher die nachfolgenden planungsrelevanten Angaben enthält:

- Produkt
- Menge

- Zeit
- Priorität

Das Produkt beschreibt hierbei ein durch verschiedene Prozessschritte herzustellendes Objekt, welches letztendlich an den Kunden vertrieben wird. Die Menge ist entscheidend für die Anzahl der Durchführungen einzelner Jobs bzw. Aufgaben. Durch die Zeitangabe wird hinterlegt, auf wann der späteste Fertigstellungszeitpunkt des Auftrags im Planungs- und Steuerungssystem terminiert ist. Die Einführung der Auftragspriorität entscheidet darüber, ob Planungsänderungen am Produktionsprogramm vorgenommen werden müssen oder ob der Auftrag in das bestehende Produktionsprogramm integriert werden kann. Aus den Auftragsangaben bzw. insbesondere aus dem zu erstellenden Produkt werden sog. Jobs generiert. Diese sind die durchzuführenden Schritte, um zum fertigen Produkt bzw. Auftrag zu gelangen und können weiter, wie zu Beginn beschrieben, zu durch den Roboter ausführbare Aufgabenabläufen ausgeplant werden. In Summe wird so die Anwendung eines aufgabenorientierten Ansatzes von der Ebene der Produktionsplanung und -steuerung bis zur Feldebene ermöglicht.

Im Projekt wurden für definierte Anwendungsfälle Aufträge, Jobs und Aufgaben definiert. Als „Kommissionieren“ wird beispielsweise die Aufstellung benötigter Teile aus dem Lager, die Zusammenstellung und die Auslieferung an einen festgelegten Ort verstanden. Die definierten Jobs werden im Rahmen der aufgabenorientierten Planung in definierte Aufgaben untergliedert, welche in Summe dem durch die Ressourcen bereitgestellten Fähigkeiten-Set (AP 3.2) gleichen. Eine identifizierte Herausforderung ist die Wahl der Granularität, bis zu der die Aufgaben systemtechnisch geplant werden bzw. bis zu den Funktionalitäten innerhalb einer Fähigkeit zusammengefasst, umgesetzt und angeboten werden (vgl. TP 1 und TP 2). Weitere für den Use Case im Projekt betrachtete Jobs sind die „Fahrtbegleitende Vormontage“, „Montage mit Werkkraft“ bzw. „Montage mit Roboter“. Diese Jobs werden in die Aufgaben Pick, Place, Place mit Führen, Fügen, und Navigieren unterteilt und können kombiniert werden, um alle im Use Case notwendigen Arbeitsschritte abzubilden.

Auf Basis der Empfehlungen aus der zweiten Zwischenbegutachtung wurde in Zusammenarbeit mit TP 1 die Eingliederung des Menschen in das Betriebsmittelkonzept und damit einhergehend dessen dynamische Einplanung in die Produktionsprozesse der Fabrik nochmals tiefergehend betrachtet. In Zusammenarbeit mit TP 1 wurde die kompetenzbasierte Beschreibung der Mitarbeiter nach Korder et al. (2019) als geeignetes Konzept ausgewählt. Die Vorstellung des Mitarbeiter-spezifischen Kompetenzmodells erfolgte bereits in AP 1.2.1. Innerhalb von TP 3 wird die zielgerichtete Einplanung der Akteure betrachtet. Die vorgeschlagene Kompetenzbeschreibung des Menschen sieht, analog zur Betriebsmittelmodellierung, eine Fähigkeiten-basierte Modellierung der technisch-methodischen Kompetenzen vor. Dies hat den großen Vorteil, dass die im zweiten Zwischenbericht vorgestellte Modellhierarchie für Aufgaben (vgl. AP 3.1.2 im zweiten Zwischenbericht) für die Zuweisung von Aufgaben zu Menschen oder technischen Betriebsmitteln in gleicher Weise genutzt werden kann. Darüber hinaus ist es zukünftig denkbar, die weiteren Kompetenzprofile eines Mitarbeiters (persönlich, sozial-kommunikativ, usw.) zu nutzen, um ihm Jobs entsprechend seiner persönlichen Stärken und Vorlieben zuzuweisen.

Arbeitspaket 3.1.3: Modellierung der Ressourcen im dynamischen Umfeld

Innerhalb des dritten Projektjahres wurde die Kommunikationsschnittstelle zwischen den einzelnen Ressourcen und dem übergeordneten PPS-System weiterentwickelt. Als Kommunikationsprotokoll wurde hierfür bereits in den ersten beiden Jahren OPC UA ausgewählt. Grundlage für die Kommunikation über OPC UA bildet das Informationsmodell, welches eine semantische Interpretierbarkeit der, zwischen den Systemen kommunizierten, Informationen sicherstellt. Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit von TP 1, TP 2 und TP 3 sowie den Industriepartnern ITQ und Software Factory ein entsprechendes Modell erarbeitet. Eine detaillierte Beschreibung ist in AP 1.2.2 zu finden. TP 3 kann hierüber zum einen Jobs an den Roboter übersenden und zum anderen die folgenden Informationen über die Ressource einsehen:

- Name
- Kinematischer Aufbau inkl. Endeffektor
- Aktuelle Position und Geschwindigkeit
- Liste verfügbarer Fähigkeiten inkl. aktuellem Status (siehe auch AP 1.3.2)
- Verfügbarkeit inkl. aktuellem Ausführungsstatus des Jobs

Basierend auf der Skilldefinition von Hammerstingl (2016) wurde das entwickelte Fähigkeitenmodell in das PPS System integriert. Dieses Fähigkeitenmodell setzt sich zusammen aus einem neutralen Skill und mehreren Features (siehe Abbildung 36). Die Semantik ermöglicht die Zusammenstellung von mehreren Ressourcen zu funktionalen Einheiten. Für die Fähigkeit Transport wird eine funktionale Einheit aus der mobilen Produktionsressource und der Motorhalterung gebildet. Eine andere funktionale Einheit stellt beispielsweise ein Roboterarm und ein dazugehöriger Greifer dar. Weder mit dem Roboterarm noch mit dem Greifer können alleine Teile gehoben werden, erst eine Kombination der beiden Ressourcen ermöglicht das Greifen und die Manipulation von Objekten. Für jede Ressource oder Kombination von Ressourcen ergibt sich so die Ressourcenspezifischen Fähigkeiten.

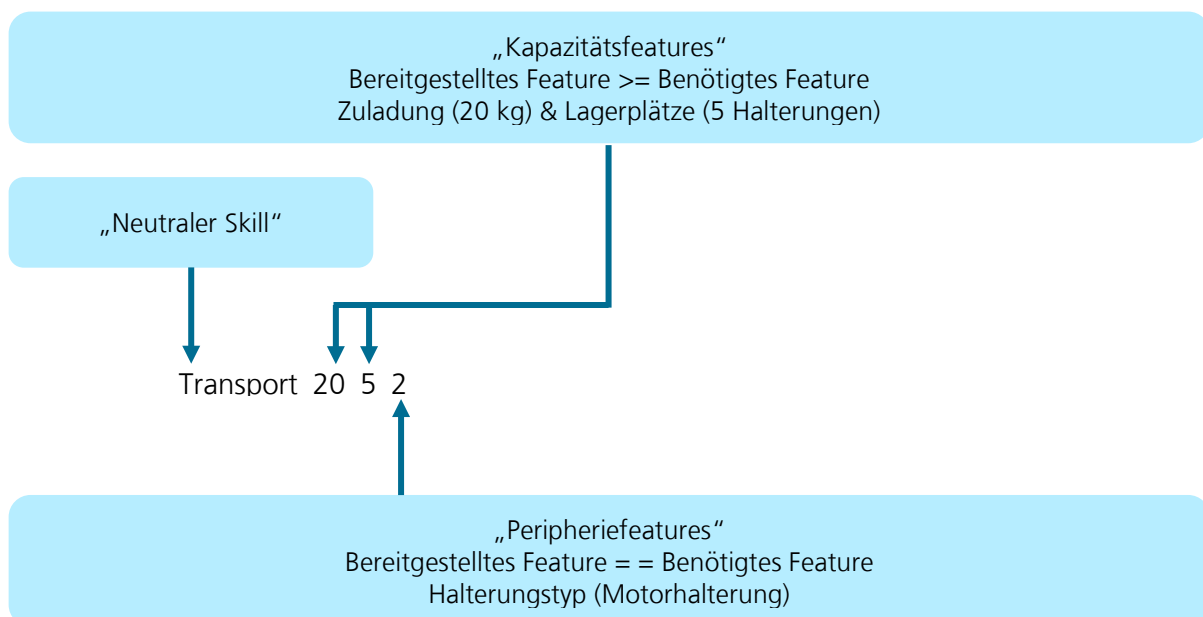


Abbildung 36: Notation der Fähigkeit "Transport" mit den dazugehörigen Features (Krä et al. 2020)

Features ermöglichen die Anreicherung des neutralen Skills mit zusätzlichen Informationen. Die Anzahl der Features ist je nach Skill frei wählbar, allerdings müssen die einzelnen Features immer mit einem Trennzeichen separiert sein.

Die Features können in zwei Kategorien unterteilt werden. Zum einen gibt es die „Kapazitätsfeatures“ und zum anderen die „Peripheriefeatures“. Die Kapazitätsfeatures beschreiben Größen wie die Tragfähigkeit, Traglast, Geschwindigkeit und weitere Größen. Peripheriefeatures beschreiben einen definierten Skill wie beispielsweise eine Halterung für ein Bauteil, einen QR-Code-Scanner oder ein bestimmtes Interaktionsmedium. Bedingt durch die Struktur des entwickelten Add-Ons (AP 3.2.3) müssen die Kapazitätsfeatures bei allen Fähigkeiten an der gleichen Stelle in der Beschreibung stehen. Fähigkeiten, die keine Kapazitätsfeatures besitzen, müssen an diesen Plätzen mit einer 0 belegt sein. Die entwickelte Notation ermöglicht eine individuelle Erweiterung und kann somit auf andere Problemstellungen übertragen werden. In Tabelle 3 sind exemplarisch, die benötigten Fähigkeiten für den Job „Kommissionieren“, dargestellt.

Tabelle 3: Darstellung des Jobs „Kommissionieren“ mit den dazugehörigen Fähigkeiten

| Job | Fähigkeiten |
|-----------------|----------------------------|
| Kommissionieren | Navigieren_0_0_1 |
| | Transport_4_1_1 |
| | Bewegen_400 |
| | Anwesenheit prüfen_300_0_1 |
| | Pose messen_1000_0_3 |
| | Sichern_4_0_2 |
| | Interagieren_0_0_3 |
| | Interagieren_0_0_5 |

Der Aufbau und die Notation der Features aus Tabelle 5 entspricht denen aus Abbildung 43. Die Fähigkeiten beschreiben einen neutralen Skill der mit mehreren Kapazitäts- und Peripheriefeatures erweitert wurde. Die Fähigkeit „Sichern_4_0_2“ aus Tabelle 5 beinhaltet als erstes Kapazitätsfeature die Traglast des Roboterarms. In dieser Anwendung besitzt der Roboterarm eine Traglast von 4kg, weswegen das Kapazitätsfeature mit einer 4 gekennzeichnet ist. Da die Fähigkeit Sichern nur ein Kapazitätsfeature hat, steht als zweites eine 0. An dritter Stelle steht das erste Peripheriefeature, für die Fähigkeit Sichern wird hier der Greifer gekennzeichnet. Die 2 bedeutet, dass der Roboterarm einen speziellen Motorgreifer mit der ID 2 hat.

Arbeitspaket 3.1.4: Methode zur Aufgaben- und Ressourcenbeschreibung

Die erarbeiteten Inhalte (siehe auch Bericht zum zweiten Projektjahr) für die Beschreibung der Aufgaben und Ressourcen werden abschließend zur Implementierung in das Planungssystem vorbereitet. Im Planungssystem des Industriepartners S4P wurde die Methodik zur ressourcenneutralen Aufgabenbeschreibung sowie die Beschreibung der Ressourcen, die in Kooperation mit TP 1

und TP 2 erarbeitet wurden, integriert: Wie oben beschrieben, wird den Aufgaben eines Auftrags (vgl. AP 3.1.2) keine Ressource explizit zugeordnet, sondern benötigte Fähigkeiten. Die Ressourcen wiederum stellen abhängig von ihren Eigenschaften Fähigkeiten bereit. Die Anforderungen der Jobs eines Auftrags können im Anschluss im Rahmen des Anforderungen-Fähigkeiten-Abgleichs mit den Fähigkeiten, die die Ressourcen anbieten, verglichen werden. Dies ist die Voraussetzung für die Zuordnung auf Systemebene, die im Arbeitspaket 3.2 betrachtet wird.

Arbeitspaket 3.2: Zuordnung der Aufgabe zur Ressource durch Abgleich der Fähigkeiten auf Systemebene

Kernelement der Planung ist die Zuordnung der Aufgaben zu den ausführenden Betriebsmitteln. In Arbeitspaket 3.2 wird der Ablauf von einem eingehenden Auftrag über den Matching Algorithmus zu einem Lösungsraum, der mögliche Kombinationen von Aufgaben und Ressourcen enthält, betrachtet. Dieser Lösungsraum enthält auch Aufgaben, die einem Team aus Ressourcen zugeordnet wurden.

Arbeitspaket 3.2.1: Identifikation der Randbedingungen und Definition einer übergeordneten Lösungsstrategie

Unter Berücksichtigung identifizierter Randbedingungen wurde ein ganzheitlicher Lösungsansatz zur aufgabenorientierten Planung im zweiten Projektjahr vorgestellt und im dritten Projektjahr weiter ausgearbeitet. Abbildung 37 zeigt eine Übersicht über das Gesamtsystem mit Verbindung zwischen realer und digitaler Welt. Das digitale Abbild zeigt den aktuellen Status der Produktionsumgebung und der sich darin bewegenden Ressourcen.

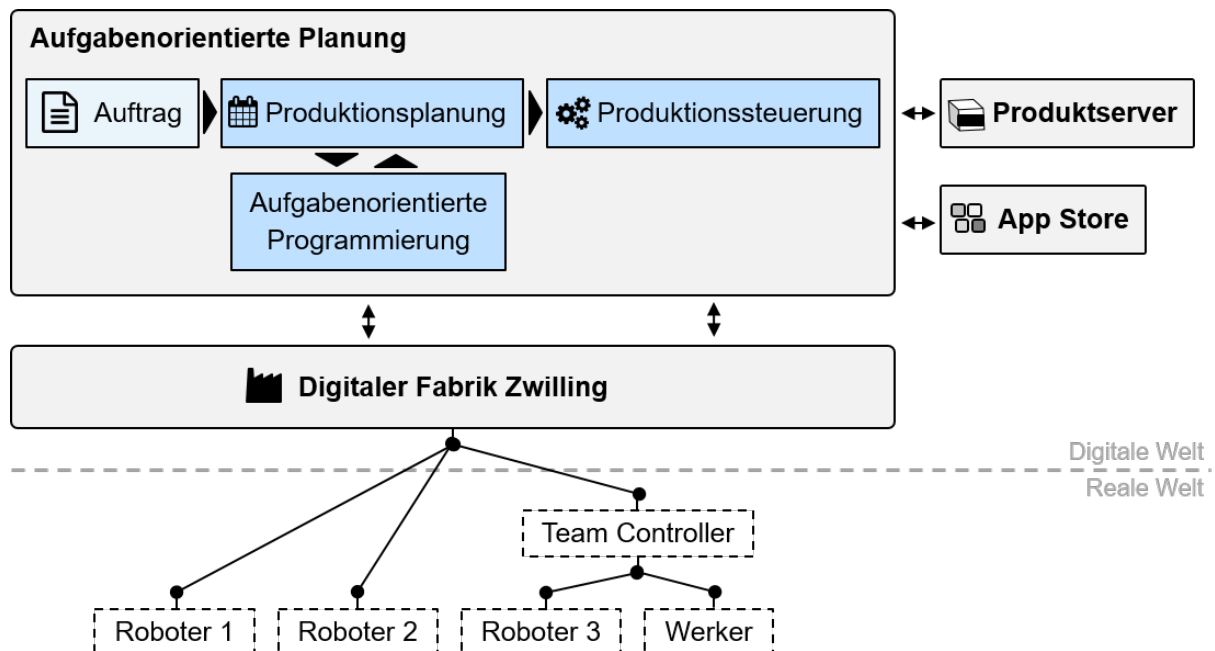


Abbildung 37: Schematische Übersicht zur aufgabenorientierten Planung

Ein eingehender Auftrag wird in der Produktionsplanung angenommen und in Kombination mit der aufgabenorientierten Programmierung ausgeplant. In der aufgabenorientierten Programmierung wird in drei Schritten die Aufgabensequenz für die Bearbeitung eines Jobs durch eine Ressource abgeleitet:

- Anforderungen-Fähigkeiten-Abgleich
- Ableitung der Aufgabensequenz
- Integration der aufgabenspezifischen Informationen

Ergebnis der Planung ist das Produktionsprogramm, das nach jeder Änderung an die Produktionssteuerung weitergeleitet wird. Dort wird die Abarbeitung der anstehenden Jobs durch die jeweilige Ressource angestoßen und überwacht. (vgl. zweiter Zwischenbericht)

Arbeitspaket 3.2.2: Entwicklung einer Methode zur automatisierten Ableitung von Einzeltasks aus dem ressourcenunabhängigen Aufgabenmodell

Entsprechend der Empfehlungen der Gutachter bei der zweiten Zwischenbegutachtung wurden im dritten Projektjahr die Arbeiten zum AI-Planen vertieft. Das AI-Planen wird innerhalb des Moduls zur aufgabenorientierten Programmierung zur Ableitung einer detaillierten Aufgabensequenz auf Basis der Job-Beschreibung und der durch einen Akteur verfügbaren Fähigkeiten eingesetzt. Aufbau und Funktionalitäten des Moduls zur aufgabenorientierten Programmierung sowie dessen Eingliederung in das ganzheitliche aufgabenorientierte PPS-System wurden in AP 3.2.1 zusammenfassend in diesem Bericht und ausführlich im zweiten Zwischenbericht beschrieben. Bezogen auf die Anwendung des AI-Planens wurde innerhalb des zweiten Projektjahres die Eignung zur Ableitung einer detaillierten Aufgabensequenz aus einer abstrakten Aufgabenbeschreibung in Form eines Jobs gezeigt (siehe AP 3.2.2 im zweiten Zwischenbericht).

Die grundlegende Funktionsweise eines AI-Planers ist in Abbildung 45 dargestellt und wird auf Basis von Russel und Norvig (2016) mit Bezug auf die Anwendung im Projekt vorgestellt: Mit Hilfe der Planning Domain Definition Language (PDDL) werden Planungsdomäne und -problem beschrieben. Die Domäne beschreibt hierbei die Anwendungsdomäne als deskriptives Modell. Das Problem spezifiziert den aktuellen Startzustand sowie einen zu erreichenden Zielzustand. Bezogen auf das Projekt FORobotics wird als Startzustand der aktuelle Zustand des Akteurs sowie der Zielzustand, der nach Abarbeitung eines Jobs erreicht werden soll, beschrieben. Planungsdomäne und -problem werden einem domänenunabhängigen Planungsalgorithmus (AI-Planer) übergeben, welcher die durchzuführenden Aktionen bestimmt, um ausgehend vom Start- den Zielzustand zu erreichen. Innerhalb des Projekts werden durch die verfügbaren Fähigkeiten des Roboters die ausführbaren Aktionen bestimmt, welche in der Domänenbeschreibung abgebildet werden. Auf dieser Basis bestimmt der AI-Planer eine detaillierte Sequenz an Teilaufgaben, die zur Erfüllung des gegebenen Jobs, abgearbeitet werden muss. Der ausgeplante Job inkl. detaillierter Aufgabensequenz kann im Anschluss vom PPS-System an einen geeigneten Akteur übergeben werden (siehe AP 3.4.2).

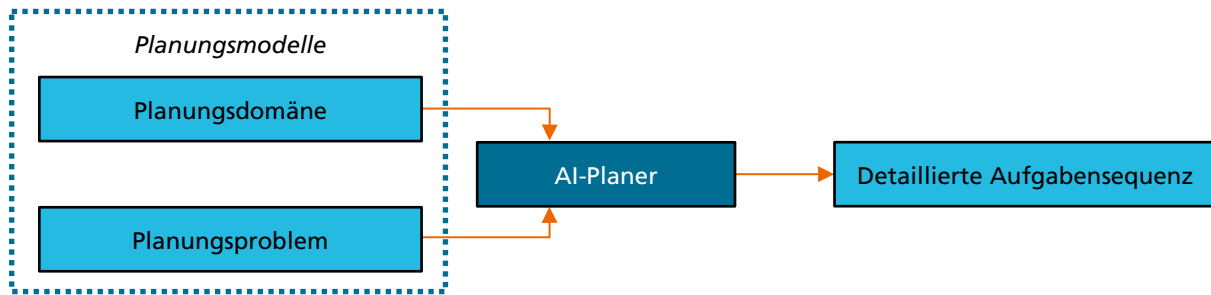


Abbildung 38: Grundlegende Funktionsweise eines AI-Planers

Innerhalb des dritten Projektjahres wurde innerhalb dieses APs zum einen die automatisierte Generierung der Planungsmodelle sowie die Optimierung der Aufgabensequenz nach einem vorgegebenen Kriterium, wie z.B. der Zeit, vertieft untersucht. Die Untersuchungen zum AI-Planen lassen sich in den Bereich der aufgabenorientierten Programmierung eingliedern und wurden prototypisch ohne Integration in den TP3-Gesamtdemonstrator (siehe AP 3.4.4) durchgeführt.

Arbeitspaket 3.2.3: Anforderungen-Fähigkeiten-Abgleich unter Berücksichtigung der Teammodellierung

Zur Umsetzung des Anforderungen-Fähigkeiten-Abgleich wurde im dritten Projektjahr ein Add-On für die Planungssoftware S4P entwickelt, welches speziell einen teamorientierten Fähigkeitenabgleich durchführt. Im ersten Schritt werden die angelegten Aufträge sowie die zur Verfügung stehenden Ressourcen via JSON-Dateien aus dem Planungssystem exportiert und eingelesen. Aus diesen Daten werden auftragsseitig für alle Jobs und von allen Ressourcen jeweils die Fähigkeiten extrahiert und anschließend abgeglichen. Für jeden Job des Auftrags werden die übereinstimmenden Ergebnisse in einer „Job-Ressourcen“ Datenbank gespeichert. Zusätzlich dazu werden anhand der Fähigkeiten Teams gebildet, die durch ihre Fähigkeiten für den Job geeignet sind und ebenfalls in der „Job-Ressourcen“ Datenbank gespeichert.

Bei der Teamzusammenstellung wird neben einem reinen Fähigkeitenabgleich, d. h. besitzt eine Ressource die gesuchte Fähigkeit, zusätzlich geprüft, ob die Features der Fähigkeit für den Job ausreichen. Wie in AP 3.1.3 beschrieben, gibt es in der verwendeten Nomenklatur (siehe Abbildung 36) Features, die mit einem \geq verglichen werden und Features, die genau übereinstimmen müssen.

Für die Teammodellierung wird innerhalb der Ressourcen nach Ressourcenteams gesucht, die durch die Kombination ihrer Fähigkeiten, die benötigten Fähigkeiten eines Jobs besitzen. Zum einen werden für die Kapazitätsfeatures die Fähigkeiten aller beteiligten Ressourcen addiert um den benötigten Kapazitätswert zu erreichen. Zum anderen müssen die benötigten Peripheriefeatures durch mindestens eine Ressource des Teams bereitgestellt werden.

Die Einträge in der „Job-Ressourcen“ Datenbank werden anschließend mittels einer Vielzahl an unterschiedlichen Prioritätsregeln wie z.B. frühester Starttermin, frühester Fertigstellungstermin, kürzeste Durchlaufzeit oder First in First out in eine Rangordnung gebracht. Eine Zuteilung der Ressourcen zu den Jobs nur anhand des Fähigkeitenabgleichs erzeugt ein nicht realistisches Produktionsprogramm. Hier zeigten die Untersuchungen, dass einerseits zu viele Ressourcen in einem

Job gebunden sind oder die Ressourcen innerhalb eines Auftrags zu stark variieren. Aus diesem Grund wurden zwei zusätzliche Regeln implementiert:

- Die maximale Anzahl an kooperierenden Ressourcen für einen Job ist 3.
- Führt eine Ressource Job n des aktuellen Auftrags aus und kann durch ihre Fähigkeiten Job $n+1$ des gleichen Auftrags ausführen oder Teil des ausführenden Teams sein, wird diese Ressource auch für Job $n+1$ eingeplant.

Die Ergebnisse zeigen, dass Produktionsprogramme ohne Kooperationen am schnellsten ablaufen, da hier weniger Ressourcen gebunden sind und für andere Jobs zur Verfügung stehen. Sind optionale Kooperationen erlaubt, kann allerdings die Bildung von Teams zu einem schnelleren Produktionsprogramm führen, da hier Ressourcen mit einem breiteren Fähigkeitsspektrum freigehalten werden. (Schiele 2020)

Arbeitspaket 3.2.4: Verfügbarkeitsprüfung der Ressourcen unter unsicheren und dynamischen Daten

Wie schon die Untersuchungen im zweiten Projektjahr gezeigt haben, stellen unsichere und dynamische Daten eine Herausforderung für PPS-Systeme dar. Hier wurden dynamische Puffer betrachtet, mit denen je nach Auftrag und Ausgangsposition die eingeplante Pufferzeit variiert.

Im dritten Projektjahr wurden die dynamischen Puffer in das entwickelte Add-On eingebunden und ein Framework entwickelt, mit dem zusätzliche Einflussfaktoren implementiert werden können. Durch den dynamischen Puffer werden Abweichungen in der Durchlaufzeit eines Auftrags ausgeglichen. Durch Störungen wie bspw. Hindernisse oder Fehlermeldungen entstehen unerwartete Verzögerungen, die in der Planung berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich gilt, je mehr Einflussfaktoren implementiert sind, desto besser kann die Realität abgebildet werden. Ein Anstieg der Umwelteinflüsse führt allerdings auch zu einer erhöhten Rechenleistung und Rechendauer. Deswegen muss hier abgewogen werden, welche Umwelteinflüsse berücksichtigt werden sollen. Getestet wurde dies für das Energiemanagement und die Wartungszyklen der Ressourcen. Zur Untersuchung der Dynamik wurden Ladezeiten und Wartungsarbeiten nicht fix terminiert, sondern ergeben sich anhand der geplanten Einsatzdauer. Der Energieverbrauch konnte nicht direkt von den Ressourcen abgerufen werden, deshalb erfolgt die Berechnung des Energieverbrauchs durch Herstellerkennwerte. Die Einsatzzeit der mobilen Plattformen beträgt 180 min. Ressourcen, deren Akkustand unter 20 % sinkt, werden für einen 20 min Schnellladezyklus eingeplant und stehen in dieser Zeit nicht zur Verfügung. Der Ladezyklus wird vor dem Einplanen der Tasks in den Arbeitsfolgen eingetragen. Um zu vermeiden, dass sämtliche Ressourcen im gleichen Zeitraum die Ladestation aufsuchen und deshalb ein Rückstau im Produktionssystem entsteht, werden für alle Ressourcentypen unterschiedliche Ladezeiträume vorgemerkt. Die Plattformen gleichen Typs erhalten jeweils einen anderen Termin für ihren ersten Ladevorgang, alle weiteren Ladevorgänge folgen zyklisch gemäß der Laufzeit der Batterie. Für die Festlegung des ersten Termins gilt, dass eine Ressource die Ladestation frühestens ansteuern darf, wenn eine andere Ressource des gleichen Typs sie gerade verlassen hat. Die Termine werden entsprechend schrittweise versetzt. Abbildung 48 zeigt einen Ablaufplan als Ergebnis der vorbereitenden Abläufe. Die Pausenzeit eines Werkers wurde ebenso wie seine Schichtübergaben zeitlich blockiert. Die Ladezyklen der Plattformen wurden ohne zeitliche Überschneidung eingeplant, Plattform 1 durchläuft zum Ende der Schicht einen Wartungstermin. (vgl. auch Schiele 2020)

Die Zyklen führen zu einer verstärkten Einplanung des Menschen als Kooperationspartner, da dieser aktuell eine höhere Verfügbarkeit hat als die mobilen Ressourcen. Eine Erhöhung der angenommenen Akkuleistung würde diesen Effekt vermeiden. Da aktuell der Energieverbrauch über die eingeplante Zeit im Produktionsprogramm abgeschätzt wird, führen die dynamischen Puffer zu verfrühten Ladezyklen. Die Ressource wird dadurch zu einem Ladezyklus eingeplant, obwohl ihr Akkustand noch über 20 % liegt. Dies kann umgangen werden, wenn der Energieverbrauch direkt von der Ressource abgefragt wird.

Abgebildet werden die verschiedenen Ressourcenzustände und Verfügbarkeiten in der Steuerungssoftware Thingworx. Mit einer bidirektionalen Informationsabfrage werden die Informationen zum einen vom Planungssystem S4P und zum anderen direkt von der Ressource abgefragt. Vom Planungssystem wird abgefragt, wie die aktuelle Verfügbarkeit der Ressource ist, d.h. ist die Ressource frei, befindet sich die Ressource in einem Ladezyklus/Wartungszyklus oder bearbeitet die Ressource gerade einen Auftrag (vgl. AP 3.3.2).

Daten von der Ressource liefern dem Steuerungssystem Informationen über den aktuellen Zustand im bearbeiteten Job. Dies kann beispielsweise ein Fehlerfall oder das Warten auf eine andere Ressource in einer Teamaufgabe sein.

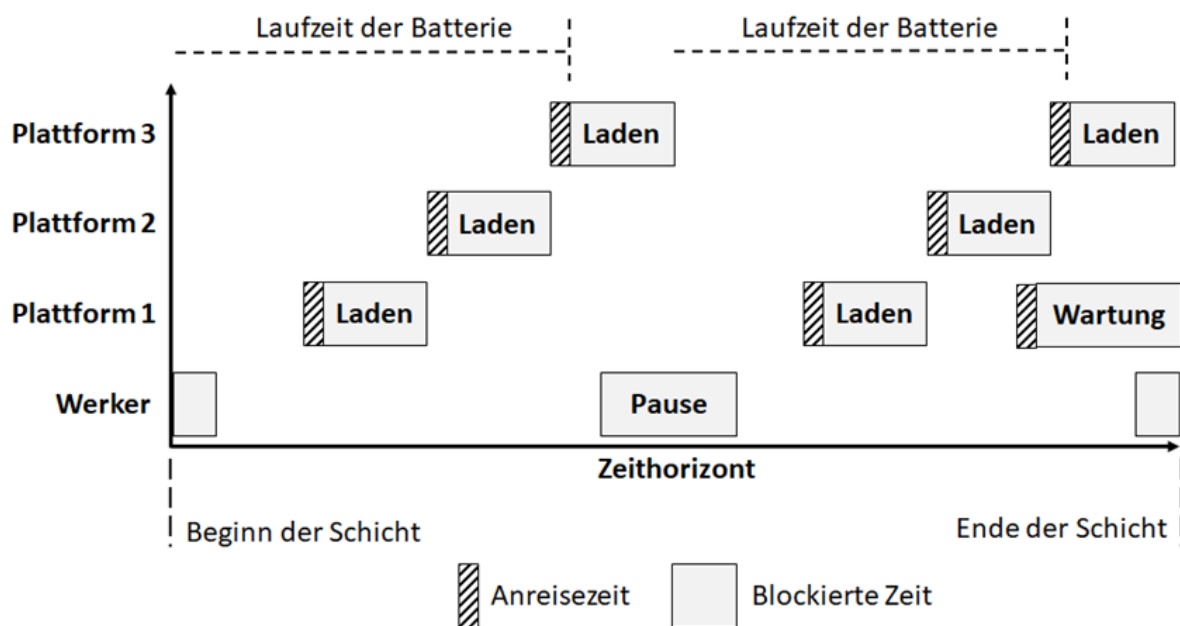


Abbildung 39: Einteilung der Lade- und Wartungszyklen im Produktionsprogramm.

Arbeitspaket 3.3: Dynamische globale Bahnplanung

Zur Navigation mobiler Ressourcen in einer Produktionsumgebung muss zunächst ein globaler Plan zur Zielerreichung ausgearbeitet werden und im Anschluss ein lokaler Plan zur Bewegungsausführung und kurzfristigen Hindernisvermeidung. Beide Schritte sind voneinander abhängig bzw. bauen aufeinander auf, da nur so vorausschauend geplant werden kann. Dynamische Hindernisse können auf diese Art und Weise durch Überholvorgänge oder Ausweichmanöver umfahren werden. (Petereit et al. 2013)

In Teilprojekt 3 wird die Bahnplanung für mobile Roboter auf globaler Ebene betrachtet, die lokale Navigation erfolgt zusammen mit der Aufnahme der Umgebungsinformationen für die Erstellung einer Karte in Teilprojekt 2. Das bedeutet, in Teilprojekt 3 liegt wie nachfolgend beschrieben der Fokus auf der übergeordneten, zentralen Betrachtung der Bahnplanung und den Einfluss- und Eingriffsmöglichkeiten auf Ebene der Produktionsplanung und -steuerung.

Arbeitspaket 3.3.1: Konzept zur dynamischen Bahnplanung von mobilen Ressourcen

Die im Projekt verwendete Plattform der Firma Grenzebach wird über einen proprietären Flottenmanager mit Bahnplanung gesteuert (vgl. TP 2). Im Zuge einer abstrahierten Betrachtung und um eine allgemeine Aussage treffen zu können, wird im Projekt auf in ROS verfügbare Bahnplaner zurückgegriffen (vgl. Arbeitspaket 2.5.1). Ziel ist es, einen bereits fahrbaren Pfad zu übergeben und lokal lediglich mit dynamischen Hindernissen umgehen zu müssen.

Für die Bahnplanung von mobilen Robotern sind Kenntnisse über befahrbare Wege und Flächen nötig. Um die globale Routenplanung für einen mobilen Roboter durchzuführen, wird eine Karte herangezogen. Fabrikumgebungen können als teilstrukturiert angesehen werden. Während Wände und Anlagen statisch sind, gibt es hochdynamische Objekte wie Menschen und mobile Roboter sowie quasistatische Objekte wie Paletten oder Rollwägen, die zwar ortsflexibel aber nicht selbstfahrend sind. Um auf Staus oder verspernte Fahrwege reagieren zu können, ist es nötig statische Karten um diese dynamischen Informationen über Hindernisse zu erweitern. Quelle dieser Umgebungsinformationen können die mobilen Roboter selbst oder bspw. ortsfeste Infrastrukturkameras sein. TP 2 befasst sich im Forschungsverbund vertieft mit Umgebungserfassung. Daher wurde in enger Kooperation mit TP 2 ein Konzept für ein geteiltes Weltmodell entwickelt, womit mehrere mobile Roboter ihre Umgebungswahrnehmungen in ein gemeinsames Modell überführen und einander zur Verfügung stellen können. Das Modell umfasst die folgenden Elemente:

- *Topologie*: räumliche Nachbarschaft, die zusammenhängende Bereiche kennzeichnet, z.B. Gänge, Flächen oder Räume
- *Geometrie*: Oberflächeninformationen von Objekten
- *Dynamik*: zukünftige, momentane oder vergangene Bewegungen

Die Funktionsweise ist eingehend in AP 2.6. beschrieben. Ebenfalls ist dort in AP 2.6.3 ein Beispiel für eine lokale Hindernisvermeidung in einem Kreuzungsszenario gegeben. Im Teilprojekt 3 werden, wie oben beschrieben, die relevanten Gesichtspunkte für eine Integration globaler Planungsaspekte bei der Identifikation von Bahnen mobiler Roboter betrachtet. Diese Trennung in globale und lokale Betrachtung eröffnet die Möglichkeit, Vorteile beider Ansätze, wie bspw. zentrale Datenverfügbarkeit, übergeordnetes Planungswissen und Weitblick bzw. dezentrale kurzfristige Reaktions- und Kommunikationsfähigkeit, zu nutzen.

Arbeitspaket 3.3.2: Definition von planungsrelevanten Zuständen

In Projektjahr 3 wurde ein Konzept zur Klassifizierung der verschiedenen Betriebszustände mobiler Ressourcen, die für das Planungs- und Steuerungssystem relevant sind, erarbeitet. Im Zusammenhang mit den möglichen Informationen, die durch mobile Ressourcen verfügbar gemacht werden können, wurden wesentliche Zustände, die zur globalen Bahnplanung benötigt werden, identifiziert. Auf Basis der Betriebsanleitung bzw. der darin enthaltenen Störungstabelle wurden Fehlerbeschreibungen der mobilen Plattform analysiert und zusammengefasst. Das Ergebnis ist in Abbildung 40 dargestellt und beschreibt in allgemeiner Form mögliche Betriebszustände mobiler

Ressourcen. Es wurde darauf geachtet, dass diese in der Planung und Steuerung berücksichtigt und durch Werkskräfte einfach und schnell interpretiert werden können.






| Status | | Beschreibung |
|---|-----------------|---|
|  | verfügbar | zum Betrachtungszeitpunkt kein Job zugewiesen |
|  | nicht verfügbar | zum Betrachtungszeitpunkt nicht verfügbar |
|  | beschäftigt | zum Betrachtungszeitpunkt wird Job ausgeführt |
|  | wartend | zum Betrachtungszeitpunkt kein Start der gemeinsamen Jobbearbeitung |
|  | gestört | zum Betrachtungszeitpunkt erfolgt Fehlermeldung |

Abbildung 40: Planungsrelevante Zustände

Die unterschiedlichen Betriebsstatus werden durch die mobilen Ressourcen aufgrund ihrer Systemeigenschaften und äußerlich einwirkenden Einflüsse und Parameter angenommen. Die Zustände werden für alle Ressourcen in Thingworx zusammengefasst und für den Anwender übersichtlich dargestellt.

Arbeitspaket 3.3.3: Modell zustandsbasierter Informationsflüsse

Im zweiten Projektjahr wurde eine Literatursauswertung zum Informationsaustausch im Kontext der globalen Bahnplanung durchgeführt, wobei sich gezeigt hat, dass sich Ansätze, die auf der Modularisierung der Ressourcen, wie beispielsweise in einer Service-oriented Architecture, aufbauen, eignen. So kann ein Spielraum für Entscheidungen auf Ressourcenebene geschaffen werden. Bezüglich Datenmanagement und Aufbau der Kommunikation kann keine allgemeine Aussage zur Trennung zwischen dezentralen und zentralen Konzepten getroffen werden. Aus diesem Grund wurde eine Simulationsstudie durchgeführt, die zeigt, dass Entscheidungen, die kurzfristig notwendig sind und einen kürzeren Horizont bedienen, tendenziell dezentral getroffen werden sollten. Für weitreichendere Problemstellungen führt eine zentrale Entscheidung auf Grundlage zentral verfügbarer Daten zu besseren Resultaten. Für die Kommunikation ist die Anzahl der beteiligten Ressourcen und die eventuelle Notwendigkeit einer vermittelnden Einheit ein bedeutender Faktor.

Über die Verbindung von mobiler Ressource zum Produktionsplanungs- und -steuerungssystem können die verschiedenen Ressourcenzustände (vgl. AP 3.3.2) abgefragt, übermittelt und letztendlich berücksichtigt werden. Die Betriebszustände beeinflussen die aktuelle und zukünftige Ablaufplanung und folglich die Zuordnung von mengen- und termingebundenen Aufträgen. Eine dynamische Produktions- und globale Bahnplanung reagiert flexibel auf sich ändernde Betriebszustände und weist Aufträge, Tasks oder Jobs zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt „verfügbaren“ Ressourcen zu. Die ständige Abfrage der Betriebszustände und die Berücksichtigung im Produktionsplanungs- und -steuerungssystem trägt zu einer transparenten und prä-

ventiven Planung bei. Dies erfordert einen Austausch zwischen den Ressourcen, um die beschriebenen Informationen zum einen zentral verarbeiten zu können und zum anderen ebenfalls zurück an die Shop Floor Ebene zu verteilen (vgl. auch Inhalte von Arbeitspaket 3.4).

Arbeitspaket 3.3.4: Dynamische Bahnplanung mobiler Ressourcen

Ziel einer dynamischen Bahnplanung abhängig von der derzeitigen Layoutsituation ist ein stabilerer Produktionsablauf durch das Vermeiden von Konfliktsituationen bereits in der Planung und nicht erst während der Fahrt der mobilen Ressourcen (vgl. auch Spannagl 2019).

Die Auswertung relevanter Literatur (durchgeführt in Krä et al. 2020) zeigt, dass zur Kollisionsvermeidung auf Shop Floor Ebene überwiegend folgende Strategien eingesetzt werden:

- **Umfahrung:** Es wird – soweit Layout-bedingt möglich – vermieden, dass sich neu einzuplanende Pfade mit bereits geplanten kreuzen. Dies führt dazu, dass neue Routen häufig längere Strecken haben.
- **Fahrzeugpriorisierung:** Bei kreuzenden Pfaden hat die höher-priorisierte Ressource Vorfahrt. Die andere Ressource wartet vor dem Kreuzungspunkt, bis der Weg wieder frei ist. Die Prioritäten leiten sich aus den Aufträgen ab (vgl. Abbildung 41).

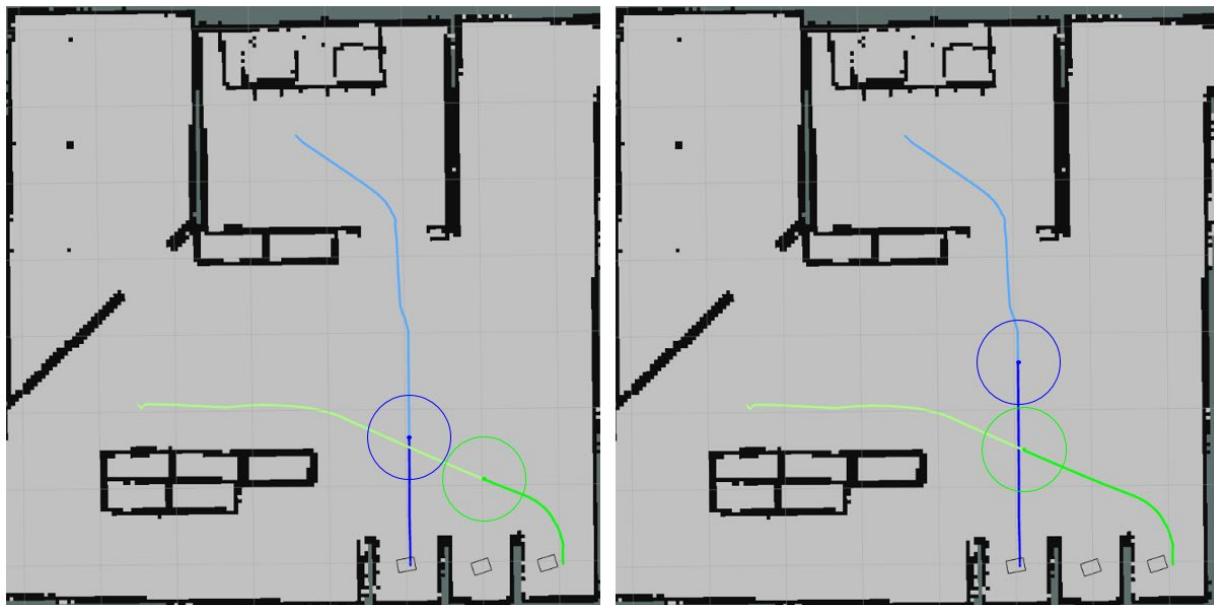


Abbildung 41: Höhere Priorisierung der mobilen Ressource auf der blauen Strecke

- **Startzeit:** Da die Durchschnittsgeschwindigkeiten der mobilen Ressourcen und die Länge der Strecke bekannt sind, kann berechnet werden, bei welchen Startzeitpunkten eine Kollision verhindert werden kann. Die niedriger priorisierte Ressource startet später.
- **Geschwindigkeitsvorgaben:** Beide Ressourcen starten wie geplant, aber ihre Fortbewegungsgeschwindigkeiten werden so angepasst, dass beide nicht gleichzeitig, sondern nacheinander den als Kollisionspunkt identifizierten Knoten erreichen. Die niedriger priorisierte Ressource passiert ihn später.

Zum Vergleichen dieser Ansätze wurden zusätzlich Kriterien identifiziert, anhand derer im Rahmen verschiedener Versuche die oben beschriebenen Strategien in der verbleibenden Projektlaufzeit

getestet werden. Die Kriterien umfassen u.a. Durchlaufzeit, Termineinhaltung, Prioritätsregeln und Ablauforganisation von Produktion und Logistik. Es ist geplant in der verbleibenden Projektlaufzeit die beschriebenen Ansätze sowohl simulativ als auch mit verfügbaren Ressourcen zu testen und erste Auswertungen durchzuführen.

Arbeitspaket 3.4: Erweiterung von Planungs- und Steuerungssystemen zum Flottenmanagement mobiler Systeme

Im Rahmen der Arbeiten in den Arbeitspaketen 3.1 bis 3.3 werden die Grundlagen für die horizontale Vernetzung zwischen den Ressourcen und die vertikale Vernetzung zwischen den Ebenen einschließlich der notwendigen Schnittstellen gelegt. Im abschließenden Arbeitspaket 3.4 wird dies für das Flottenmanagement der mobilen Roboter zusammengeführt. Dies ist ein zentraler Aspekt in vernetzten Produktionssystemen und aus diesem Grund auch für FORobotics. Cyber-physische Produktionssysteme bauen auf der Kommunikation zwischen allen beteiligten Instanzen auf und erfordern aus diesem Grund eine horizontale Vernetzung zwischen den Systemen einer Ebene und eine vertikale Vernetzung zwischen diesen Ebenen und damit auch von realer und digitaler Welt.

Arbeitspaket 3.4.1: Analyse von Schnittstellen und Anforderungen

Das Arbeitspaket 3.4.1 umfasst als Vorbereitung für die drei nachfolgenden Arbeitspakete die Analyse der Schnittstellen in der Produktionsplanung und -steuerung zur Integration mobiler Ressourcen. Dies wurde in enger Abstimmung mit den Teilprojekten 1 und 2 im ersten und zweiten Projektjahr definiert. Abbildung 42 zeigt zusammenfassend eine Übersicht der erarbeiteten Gesamtarchitektur mit den Elementen der Produktionsplanung und -steuerung, dem digitalen Zwilling der Produktionsumgebung (Ressourcen und Umwelt) sowie den Betriebsmitteln.

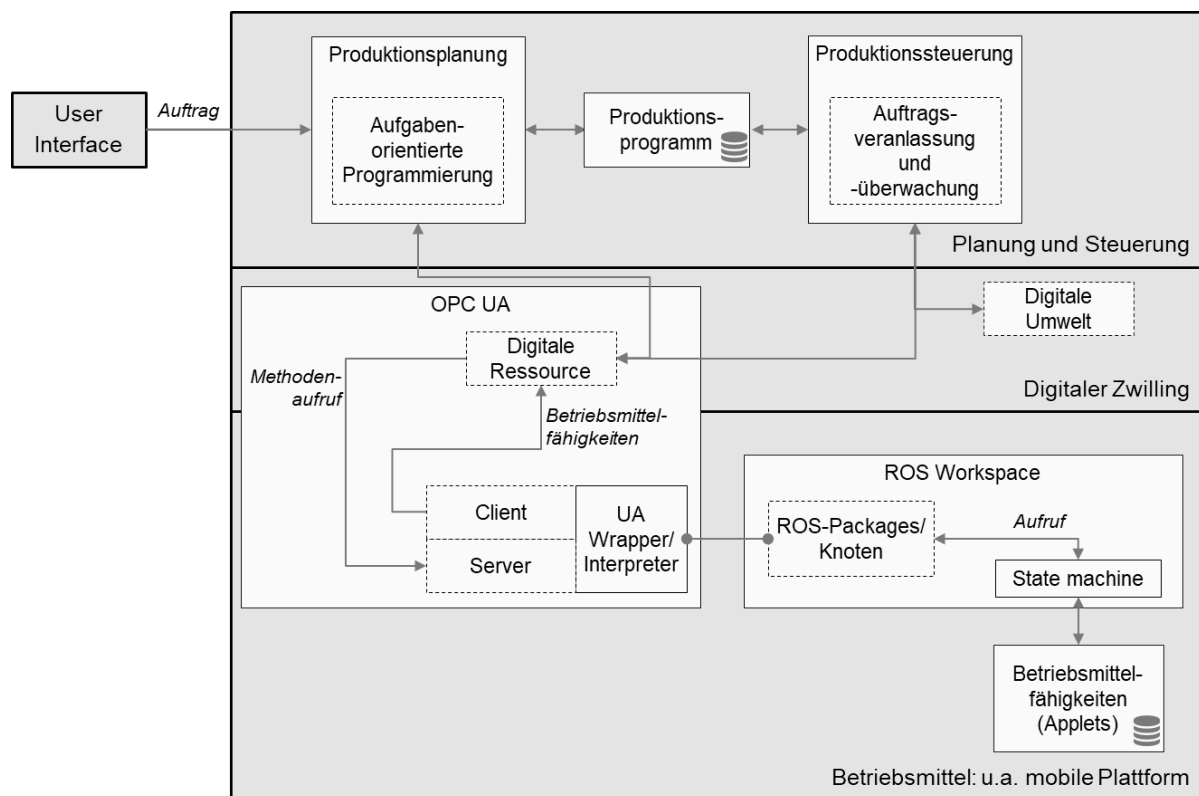


Abbildung 42: Gesamtarchitektur

Zustandsbasierte Informationen während der Ausführung einzelner Jobs durch die Ressourcen werden dynamisch über JSON-Dateien zwischen Thingworx und der jeweiligen Ressource ausgetauscht. Somit wird sichergestellt, dass das digitale Abbild der Produktionsumgebung aktuell gehalten wird. Die JSON-Datei, die von der Steuerung an die Ressource übergeben wird, beinhaltet alle notwendigen Informationen zum Aufbau der State Machines für den auszuführenden Job (vgl. TP 1 und TP 2).

Arbeitspaket 3.4.2: Horizontale und vertikale Vernetzung

Wie im zweiten Projektjahr erarbeitet, erfolgt die vertikale Kommunikation zum einen zwischen S4P und Thingworx mittels JSON-Dateien über eine REST-API und zum anderen zwischen Thingworx und den Ressourcen mittels JSON-Dateien über einen KepServer und OPC UA. Außerdem werden Informationen mit den Werkkräften und deren Interaktionssysteme ebenfalls mittels JSON-Dateien über einen KepServer ausgetauscht. Die horizontale Vernetzung zwischen dem Planungssystem und dem Add-On „Auftrag-Ressourcen“-Planer wird über JSON-Dateien und eine REST-API realisiert.

Die schnelle und einfache horizontale Vernetzung zwischen den einzelnen Robotern in der Fabrik und die vertikale Vernetzung mit dem übergeordneten PPS-System sind essentiell für eine flexible Kommunikationsarchitektur. Innerhalb des Projekts FORobotics wird das PPS-System unter zu Hilfenahme der IoT-Plattform Thingworx entwickelt. Aus diesem Grund wurde im dritten Projektjahr ein alternatives Konzept für die schnelle und einfache Integration des digitalen Zwillings von Roboterplattformen unterschiedlichen Aufbaus in eine IoT-Plattform auf Basis von OPC UA erarbeitet und in Bochtler (2019) vorgestellt. Das entwickelte Konzept eignet sich für die Integration in das

innerhalb von TP 3 entwickelte PPS-System, kann aber auch für den Kommunikationsaufbau zwischen Roboter und IoT in anderen IoT-Applikationen eingesetzt werden.

Die Grundlage für die horizontale Kommunikation bildet das in AP 1.2.2 vorgestellte Informationsmodell. Jeder Roboter stellt unter Nutzung dieses Informationsmodells eine Selbstbeschreibung zur Verfügung, die in Form eines digitalen Zwillings in eine übergeordnete IoT-Plattform eingebunden werden kann. Der Roboter fungiert hierbei als OPC UA Server und die IoT-Plattform als OPC UA Client. In AP 1.4.2 wurde das Konzept zur automatischen Konfiguration des Roboterinformationsmodells zur Abbildung der individuellen Informationen unterschiedlicher Ressourcen vorgestellt. Darauf aufbauend wurde in diesem AP ein Ansatz für die einfache und schnelle Integration des Roboters in die IoT-Plattform entwickelt. Die Ergebnisse werden im Folgenden auf Basis von Bochtler (2019) vorgestellt:

Mit Hilfe des OPC UA Client durchsucht die IoT-Plattform das lokale Netzwerk nach OPC UA Servern, wie sie von den einzelnen Robotern bereitgestellt werden. Innerhalb eines OPC UA Servers bildet jeder Roboter über das Adressraummodell seinen spezifischen Aufbau sowie seine individuellen Fähigkeiten ab. Nach Auffinden eines OPC UA Servers, kann der OPC UA Client das Adressraummodell und damit die über den Roboter verfügbaren Informationen durchsuchen, abhören und in weiteren Applikationen nutzen. Durch die Anwendung des identischen Roboterinformationsmodells auf Roboter sowie IoT-Ebene wird eine semantische Interoperabilität der kommunizierten Daten sichergestellt.

Das vorgestellte Konzept wurde am Beispiel der IoT-Plattform Thingworx validiert. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass in diesem Fall keine direkte Kommunikation zwischen Roboter und IoT-Plattform stattfindet, sondern der im Thingworx Industrial Connectivity enthaltene KepServerEX die Funktion eines IoT-Gateways übernimmt und die Daten der verfügbaren Roboter der Thingworx IoT-Plattform in strukturierter Art und Weise bereitstellt. Ein funktionsfähiges Konzept zur Realisierung der Kommunikation von Roboterebene über OPC UA mit dem KepServerEX und Anbindung von diesem an die IoT-Plattform wurde entwickelt, implementiert und erfolgreich getestet.

Im Anschluss wurde innerhalb von Thingworx eine dynamische Benutzeroberfläche auf Basis des in AP 1.2.2 vorgestellten Roboterinformationsmodells für die Zustandsüberwachung sowie das Aufgabenmanagement für einen Roboter entwickelt und prototypisch implementiert. Die Informationen im Adressraummodell eines Roboters werden innerhalb der Applikation durchsucht und dynamisch in die Benutzeroberfläche eingebunden und dort visualisiert. Die Ergebnisse werden im Folgenden anhand von Beispielen dargestellt.

Innerhalb der Zustandsüberwachung können einzelne Daten zum Aufbau und aktuellen Zustand des Roboters, welche für die aktuelle Applikation von Interesse sind, ausgewählt und angezeigt werden. Dies wurde anhand des kinematischen Aufbaus des Roboters gezeigt und ist in Abbildung 43 dargestellt.

Verfügbare Robotererelemente

| Thing | IsPartOf |
|-------------|----------------|
| Axis_1_Test | MotionDevice_1 |
| Axis_2_Test | MotionDevice_1 |
| Axis_3_Test | MotionDevice_1 |
| Axis_4_Test | MotionDevice_1 |

Daten der ausgewählten Robotererelemente

Axis_1_Test currentSpeed
 3.45123

Axis_1_Test currentPosition
 24.5621

Axis_2_Test currentSpeed
 7.3213

Axis_2_Test currentPosition
 35.3221

Abbildung 43: Zustandsüberwachung der Daten verfügbarer Robotererelemente (in Anlehnung an Bochtler 2019)

In einem ersten Schritt werden alle verfügbaren Robotererelemente in einer Liste angezeigt, dies sind beispielsweise die einzelnen Achsen des Roboters. Anschließend können einzelne Robotererelemente ausgewählt und die ihnen untergeordneten Daten eingesehen werden. Im Falle der Achsen des Roboters werden aktuelle Position und Geschwindigkeit der ausgewählten Achsen angezeigt.

Innerhalb des Aufgabenmanagements kann durch einen Anwender ein Job bestehend aus Teilaufgaben spezifiziert und zur Ausführung an den Roboter gesendet werden. Dies ist in Abbildung 44 dargestellt.

1 Anzeige der Fähigkeiten des Roboters

| Name | InputParameter | OutputParameter |
|------------------------|-----------------------------------|--|
| /pick_object_skill | /pick_object_skill_parameters | /pick_object_skill_effect |
| /navigation_skill | ?start-position ?goal-position | and (not (at-position ?start-position ?goal-position)) |
| /get_object_skill | /get_object_skill_parameters | /get_object_skill_effect |
| /drop_object_skill | /drop_object_skill_parameters | /drop_object_skill_effect |
| /approach_marker_skill | /approach_marker_skill_parameters | /approach_marker_skill_effect |

2 Auswahl und Konfiguration einer Aufgabe

| Name | InputParameter | OutputParameter |
|--------------------|-------------------------------|---------------------------|
| /pick_object_skill | /pick_object_skill_parameters | /pick_object_skill_effect |

3 Hinzufügen der Aufgabe zum Job

| Name | InputParameter | OutputParameter |
|-------------------|------------------------------|--|
| /navigation_skill | ("x":2.34,"y":2.56,"z":12) | and (not (at-position ?start-position ?goal-position)) |
| /navigation_skill | ("x":2.34,"y":1.45,"z":8.34) | and (not (at-position ?start-position ?goal-position)) |

Abbildung 44: Aufgabenmanagement zur Spezifikation und Übergabe neuer Jobs an einen Roboter (in Anlehnung an Bochtler 2019)

Im ersten Schritt werden über die grafische Benutzeroberfläche alle Fähigkeiten, die der Roboter bereitstellt, angezeigt. Da Fähigkeiten und Aufgaben semantisch korrelierend definiert sind, kann entsprechend der verfügbaren Fähigkeiten ein Ablauf aus Teilaufgaben zur Realisierung eines Jobs

definiert werden. Im zweiten Schritt können so die einzelnen Teilaufgaben ausgewählt und konfiguriert werden. Im dritten Schritt können dem Job durch den Add-Button spezifizierte Teilaufgaben hinzugefügt werden. Ist ein Job vollständig definiert, kann dieser über den Send-Button an den Roboter gesendet werden. Dieser führt den Job im Anschluss eigenständig aus und gibt wiederum Rückmeldung zum Ausführungsstatus. Dies ist in Abbildung 45 dargestellt. Auf der linken Seite wurde ein Job bestehend aus einer Abfolge an Teilaufgaben spezifiziert. Dieser wurde an den Roboter zur Ausführung gesendet. Auf der rechten Seite ist der Status der Fähigkeiten des Roboters zu sehen. Zum aktuellen Zeitpunkt wird die Fähigkeit zum Aufnehmen eines Objekts ausgeführt.

Spezifizierter Job

| Name | InputParameter |
|--------------------|---|
| /navigation_skill | {"Position x": -1.393, "Position y": 3.534, "Angle yaw": 1} |
| /get_object_skill | "Marker ID": 8 |
| /navigation_skill | {"Position x": 0.760, "Position y": 3.670, "Angle yaw": 1} |
| /drop_object_skill | "Marker ID": 8 |

Status der Fähigkeiten

State GetObject

State PickObject

State DropObject

State Navigation

Abbildung 45: Ausführung eines Jobs durch den Roboter und Anzeige des Status der Fähigkeiten (in Anlehnung an Bochtler 2019)

Das vorgestellte Konzept für die Zustandsüberwachung sowie das Aufgabenmanagement für einen Roboter wurde mit Hilfe der IoT-Plattform Thingworx implementiert. Durch die Einbindung von zwei unterschiedlichen simulierten Robotern (OpenManipulator mit Turtlebot 3 und KUKA YouBot, siehe TP D) wurde erfolgreich die Eignung des Konzepts für Roboter unterschiedlichen Typs und Aufbaus demonstriert. Außerdem wurde zum einen gezeigt, wie mit Hilfe von OPC UA relevante Daten über den Aufbau des Roboters und dessen Eigenschaften dynamisch innerhalb von Thingworx in unterschiedliche IoT-Applikationen eingebunden werden können. Zum anderen wurde gezeigt, wie innerhalb von Thingworx Jobs bestehend aus Aufgaben flexibel für den Roboter spezifiziert und an diesen über OPC UA gesendet werden können. In Summe konnte so die flexible vertikale ad-hoc Vernetzung zwischen Roboter und IoT-Plattform gezeigt werden. (Bochtler 2019)

Arbeitspaket 3.4.3: Echtzeitfähige Planung mobiler Ressourcen

Die Echtzeitfähigkeit bestimmt, ob innerhalb eines definierten Zeitraums auf ein Ereignis reagiert werden kann, wie genau dieser Zeitraum definiert ist, hängt vom Anwendungsfall ab (vgl. auch Hörbrand 2018). Aus diesem Grund wurde im dritten Projektjahr zunächst analysiert, wie die Echtzeitfähigkeit eines PPS-Programms definiert ist oder definiert werden muss. Die gewünschte Echtzeitfähigkeit von PPS-Programmen ergibt sich aus der vorherrschenden Auftragstaktung und der gewünschten Reaktionszeit auf eventuelle Fehlermeldungen.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurde für die einzelnen Teilsysteme eine Performanceuntersuchung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die entscheidenden Komponenten das Planungssystem S4P und der AI-Planer sind. Aufgrund der bestehenden Systemarchitektur der S4P Software werden für einen Planungsdurchlauf bis zu 90 s benötigt. Das entwickelte Add-On und die Kommunikation der Ressourcen benötigen zwischen 500 ms und 5 s.

Für die Echtzeitfähigkeit der mobilen Ressourcen muss auch in einem Fehlerfall möglichst schnell gehandelt werden können. Aus diesem Grund wurde im dritten Projektjahr in Zusammenarbeit mit Teilprojekt 4 eine Fehlermanagementstrategie entwickelt und in der Steuerungssoftware implementiert. Die Reaktionszeit des Fehlermanagements ist deutlich schneller als die der Planung, da dieses direkt im Steuerungssystem implementiert ist und nur von der Rückmeldung der Ressourcen abhängt. Das entwickelte Fehlermanagement ist in Abbildung 46 dargestellt.

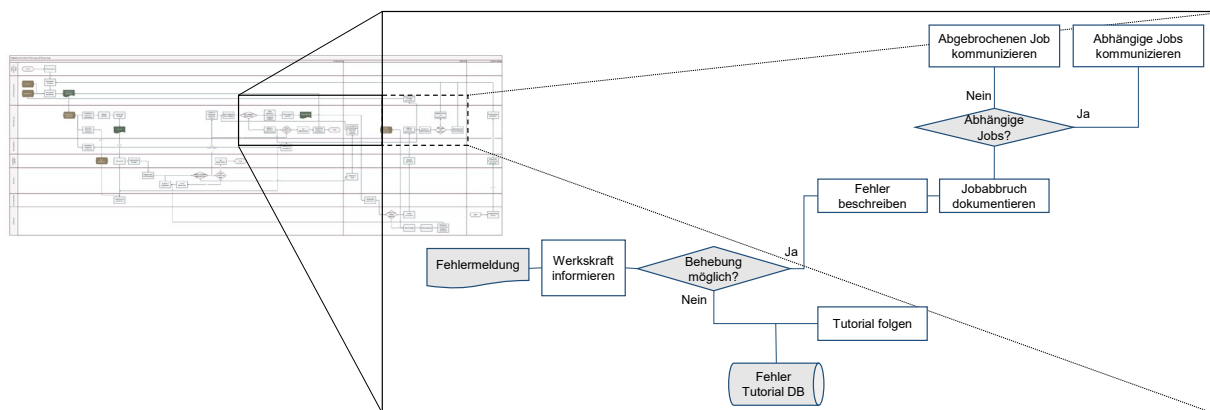


Abbildung 46: Ablaufdiagramm des Fehlermanagementsystems in der Steuerungssoftware Thingworx.

Im Fehlermanagementsystem wird zunächst erkannt, dass ein Fehler aufgetreten ist und ein Fehlerfall ausgewählt. Basierend auf dem Fehlerfall wird ein Tutorial oder eine Teleoperation gestartet. Welcher Fehlerfall vorliegt, wird von der benachrichtigten Werkkraft ausgewählt. Nach dem Durchlaufen des Fehlermanagements geht von der Steuerungssoftware ein Trigger aus, der entweder den aktuellen Auftrag fortsetzt oder eine Neuplanung veranlasst.

Arbeitspaket 3.4.4: Prototypische Umsetzung und Validierung

Für die Validierung der entwickelten Konzepte für das PPS-System wurde ein Demonstrator umgesetzt in dem die entwickelte Systemarchitektur des Planungssystems, der Steuerungssoftware und des Add-Ons dargestellt wird.

Im Planungssystem werden die Aufträge in einer GUI angelegt und anschließend über eine REST-API mittels JSON-Dateien an den „Auftrag-Ressourcen“-Planer (AP 3.2.3) übermittelt. Hier erfolgt der Abgleich der Fähigkeiten und die Zuordnung von Ressourcen oder Ressourcenteams zu den jeweiligen Aufträgen. Diese Daten werden wieder zurück an das Planungssystem übermittelt. Basierend darauf wird das Produktionsprogramm erstellt und zusammen mit der Aufgabensequenz an die Steuerungssoftware Thingworx übertragen. Notwendige Aufgabensequenzen zur Erfüllung eines Jobs werden aktuell manuell vordefiniert. Zur Steigerung der Flexibilität in den Produktionsabläufen ist für zukünftige Arbeiten eine automatisierte Ableitung erstrebenswert (siehe Untersuchungen zur aufgabenorientierten Programmierung, AP 3.2 im zweiten Zwischenbericht, und zum

AI-Planen AP 3.2.2). Die Steuerungssoftware triggert die Ressourcen dem Produktionsprogramm entsprechend an und übermittelt die relevanten Daten zur Jobausführung.

Der Demonstrator beinhaltet mehrere Ressourcen, mobile Plattformen, Werkkräfte und Werkzeugmaschinen. Alle Ressourcen kommunizieren über Thingworx mit dem Planungssystem S4P (Abbildung 42). Der Datenaustausch zwischen Thingworx und den mobilen Plattformen findet über einen ROS-Kommunikationsknoten statt. Der Informationsaustausch mit der Werkkraft erfolgt über ein Tablet an der mobilen Plattform und eine SmartWatch. Von diesen beiden Medien wird über einen Interaktionsrechner, welcher sich auf einer der mobilen Plattformen befindet, mit dem Steuerungssystem kommuniziert.

Der Fortschritt des Auftrags wird durch die Rückmeldungen der Ressourcen an das Steuerungssystem überwacht. Im Fehlerfall wird vom Steuerungssystem ein Fehlermanagementsystem (AP 3.4.3) aufgerufen und durchlaufen. Abgeschlossene Jobs werden von Thingworx zurück an die Planung im S4P-System gemeldet.

Bei der Validierung des Demonstrators ergab sich eine starke Abhängigkeit zwischen dem Produktionsprogramm und den bereitgestellten Ressourcen bzw. der Auftragslage. Die Häufigkeit und das Auftreten von Kooperationen wird maßgeblich durch die bereitgestellten Fähigkeiten und der gewählten Prioritätsregel beeinflusst. Aufgrund dieser Abhängigkeit wurden mit dem Demonstrator die Arbeitspläne mit verschiedenen Modifikationen getestet. Die Modifikationen erzwingen eine unterschiedliche Anzahl an Kooperationen für den jeweiligen Arbeitsplan. Die Testaufträge wurden mittels eines Auftragsgenerators in der gewünschten Form generiert. In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die Ergebnisse für die zeitliche Dauer der Produktionsprogramme dargestellt. Die Tests wurden mit insgesamt 15 Ressourcen (5 mobile Roboter, 3 Werkkräfte und 7 Werkzeugmaschinen) durchgeführt. (Schiele 2020)

Tabelle 4: Vergleich zwischen der Produktionsprogrammdauer mit und ohne Ladevorgängen.

| Anzahl der Kooperationen in den Arbeitsplänen | Gesamtdauer [min] | |
|--|-------------------|-------------------|
| | Ohne Ladevorgänge | Mit Ladevorgängen |
| 0 | 292,7 | 305,6 |
| 2 | 294,8 | 301,8 |
| 10 | 288,6 | 319,7 |
| 14 | 293,3 | 329,0 |
| 18 | 291,8 | 325,9 |

Wird die zeitliche Dauer der Produktionsprogramme verglichen, lässt sich eine Abhängigkeit zwischen der zeitlichen Dauer und der Anzahl der Kooperationen erkennen. Sowohl mit Ladevorgängen als auch ohne Ladevorgängen ergibt sich ein Minimum bei einer moderaten Anzahl an Kooperationen. Werden gar keine Kooperationen eingeplant oder zu viele Ressourcenteams eingeplant, führt dies zu einer Verzögerung im Produktionsprogramm. Ladevorgänge führen bei einer

Vielzahl an Kooperationen zu einer erhöhten Dauer des Produktionsprogramms. Bei beiden Versuchsreihen ergibt sich ein Optimum an Kooperationen für das Produktionsprogramm. (vgl. auch Schiele 2020)

Wie auch die mobilen Ressourcen, werden die Fähigkeiten des Menschen mit dem entwickelten Fähigkeitenmodell beschrieben. Da der Mensch häufig alle nötigen Fähigkeiten für einen Auftrag besitzt, würde ohne weitere Regeln größtenteils der Mensch für diese Jobs und den ganzen Auftrag eingeplant werden. Da in unserem Anwendungsfall, die Aufträge primär durch mobile Ressourcen bearbeitet werden sollen, wurde der Mensch als Kooperationsressource definiert. Hierdurch werden die Werkkräfte nur zur Fähigkeitenergänzung oder im Fehlerfall benötigt. Ist dies nicht erwünscht, so kann die Einplanung des Menschen im Planungsprogramm entsprechend angepasst werden.

Die restliche Projektlaufzeit wird genutzt, um die erarbeiteten Inhalte anhand der bisherigen Erkenntnisse weiter zu evaluieren und die Einplanung der Werkkräfte zu optimieren.

4.3.4 Kooperation mit anderen Teilprojekten

Die themenübergreifende Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten erfolgte durch die Teilnahme an den teilprojektübergreifenden Projekttreffen und Workshops.

Kooperation mit Teilprojekt 1 und 2

Wegen der Wahl eines aufgabenorientierten Ansatzes für die Planung und Steuerung der Ressourcen erfolgte die Zusammenarbeit mit Teilprojekt 1 und 2 maßgeblich im Bereich der Modellhierarchie zur Beschreibung von Aufgaben und Fähigkeiten und deren Implementierung sowie der Kommunikationsarchitektur und dem Datenaustausch mit der Feldebene. Außerdem wurde in Kooperation mit Teilprojekt 2 die Bahnplanung betrachtet, insbesondere das Zusammenspiel von globaler und lokaler Bahnplanung sowie der Austausch der in Teilprojekt 2 aufgenommenen Karte.

Kooperation mit Teilprojekt 4

Mit Teilprojekt 4 und dem Industriepartner Teamware wurden die Inhalte und die Darstellung der GUI für das iPad zur Interaktion einer Werkkraft mit den Informationen der Steuerung bearbeitet. Kernelement ist der Informationsaustausch. Außerdem erfolgten Abstimmung zum Management von Fehlern und die Kommunikation mit der Werkkraft in diesem Kontext.

Kooperation mit Teilprojekt 5

Mit Teilprojekt 5 erfolgte ein Austausch zu Themen der Aufgabenaufteilung zwischen Werkkräften und Robotern und Gestaltung der GUI unter Mitwirkung von Teilprojekt 4.

Kooperation mit Teilprojekt D

Mit Teilprojekt D wurde die Implementierung des Planungssystems und der IoT-Plattform für das Steuerungssystem durchgeführt und die Infrastruktur aufgebaut. Dabei wurde ein Server aufgesetzt und die Schnittstellen nach außen implementiert, um den Zugriff auch standortunabhängig zu gewährleisten.

4.3.5 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Teilprojekts sind folgende Veröffentlichungen entstanden:

- Heuss, L.; Lux-Gruenberg, G.; Hammerstingl, V.; Schnös, F.; Rinck, P.; Reinhart, G.; Zäh, M.: Autonome mobile Roboter in der Smart Factory – Dynamische Planung und Adaption mobiler Roboter für die flexible Produktion. Wt Werkstattstechnik online 108 (2018) 9, S. 574-579.
- Heuss, L.; Roder, S.: Mobile ad-hoc kooperierende Roboterteams in der Fabrik der Zukunft. Handling (2018)
- Krä, M.; Hörbrand, S.; Schilp, J.: Dynamic production control for flexibility in Cyber-Physical Production Systems. Procedia CIRP, CMS 2019
- Krä, M.; Schilp, J.: Auf die Planung kommt es an. Handling (2019)
- Heuss, L.; Reinhart, G.: Integration of Autonomous Task Planning into Reconfigurable Skill-Based Industrial Robots. 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vienna, Austria, 2020, S. 1293-1296.
- Roder, S.Q., Rothmeyer, F., Spiegelberger B., Reinhart G.: Development of a Shared Environment Model with Dynamic Trajectory Representation for Multiple Mobile Robots. In: Schüppstuhl T., Tracht K., Henrich D. (eds) Tagungsband des 5. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg (2020)
- Krä, M.; Vogt, L.; Spannagl, V.; Schilp, J.: Multi-agent path planning: comparison of different behaviors in the case of collisions. In: Schüppstuhl T., Tracht K., Henrich D. (eds) Tagungsband des 5. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg (2020)
- Krä, M.; Vogt, L.; Härdtlein, C.; Schiele, S.; Schilp, J.: Production planning for collaborating resources in cyber-physical production systems. Procedia CIRP, CMS 2020

4.3.6 Literaturverzeichnis

Bochtler, M. (2019): Flexible Integration und Nutzung von Robotersystemen in einer IoT-Plattform. Semesterarbeit. Technische Universität München, München (2019)

Hammerstingl, V., Reinhart, G. (: "Fähigkeiten in der Montage", DOI: doi.org/10.13140/rg.2.2.22520.75526, Veröffentlicht unter <http://media-tum.ub.tum.de/?id=1370174>

Heuss, L.; Lux-Gruenberg, G.; Hammerstingl, V.; Schnös, F.; Rinck, P.; Reinhart, G.; Zäh, M. (2018): Autonome mobile Roboter in der Smart Factory – Dynamische Planung und Adaption mobiler Roboter für die flexible Produktion. Wt Werkstattstechnik online 108 (2018) 9, S. 574-579.

Hörbrand, S. (2018): Methode zur dynamischen Produktionssteuerung im Umfeld mobiler Ressourcen (2018)

Korder, S.; Tropschuh, B.; Reinhart, G. (2019): A Competence-Based Description of Employees in Reconfigurable Manufacturing Systems. In: Ameri, F.; Stecke, K. E.; Cieminski, G.; Kiritsis, D. (Hrsg.): Advances in production management systems. Production management for the factory of the future. Austin, USA, 1-5.9.2019. Cham, Schweiz: Springer Nature 2019, S. 257-264. ISBN: 978-3-030-29999-6.

Krä, M.; Vogt, L.; Spannagl, V.; Schilp, J. (2020): Multi-agent path planning: comparison of different behaviors in the case of collisions. In: Schüppstuhl T., Tracht K., Henrich D. (eds) Tagungsband

des 5. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg (2020)

Petereit, Janko; Empter, Thomas; (2013): Kombinierte Pfad- und Trajektorienplanung für autonome mobile Roboter. Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB

Russel, S.; Norvig, P. (2016): Artificial Intelligence – A Modern Approach. Harlow: Pearson Education Limited 2016. ISBN: 9781292153964

Schiele, S. (2020): Emergente Ablaufplanung in flexiblen Produktionssystemen mit kooperierenden Ressourcen (2020)

Spannagl, V. (2019): Path planning for multiple resources in a dynamic production environment (2019)

4.4 TEILPROJEKT 4 – INTERAKTION

Julia Berger, Shuang Lu, Andreas Blank, Michael Riedl, Dominik Henrich

4.4.1 Allgemeine Angaben

Beteiligte Partner:

- Framatome GmbH (vormals AREVA GmbH)
- ITQ GmbH
- MAN Truck & Bus AG
- Mayser GmbH & Co. KG
- Metrilus GmbH
- Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG
- SALT Solution AG
- Software Factory GmbH
- Stäubli Tec-Systems GmbH
- Teamware GmbH

Projektleitung:

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV

4.4.2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Auch bei einem hohen Automatisierungsgrad in der Produktion hat der Mensch in der Produktion weiterhin eine wichtige Rolle. Durch sich verändernde Einsatzgebiete der Roboter, weg von Schutzräumen, hin zu einem flexiblen Einsatz in gemeinsamen Arbeitsräumen mit dem Menschen, ergeben sich neue Möglichkeiten einer flexiblen Automatisierung. Dies gelingt vor allem durch die Entwicklung von kollaborativen Robotern, die durch die Integration von Sensorik und das Design für den Menschen sicherer gestaltet sind. Jedoch muss für eine erfolgreiche Kooperation zwischen Mensch und Roboter nicht nur die Sicherheitstechnik gewährleistet sein, sondern es muss dem Menschen ermöglicht werden, mit dem technischen System zu kommunizieren und zu interagieren. Dazu gilt es, neben ergonomischen Bediensystemen, auch zweckmäßige, robuste und möglichst multimodale Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine mit einer hohen Nutzerakzeptanz zur Verfügung zu stellen. Hierzu gehören einerseits Systeme, über die intuitiv einfache Befehle an das technische System durch den Nutzer gegeben werden können. Andererseits müssen Verfahren zur Programmierung des Roboters gefunden werden, die eine Bedienung des Roboters durch Nicht-Expert*innen ermöglichen.

Ebenso wie die zu erweiternden Interaktionsfähigkeiten der Robotersysteme werden zu einer geeigneten Kooperation zwischen Mensch und Roboter kognitive Fähigkeiten des technischen Systems benötigt. Diese ermöglichen es dem Robotersystem, auf den Nutzer zu reagieren.

Ausgehend vom zu untersuchenden Anwendungsfall werden im Teilprojekt 4 Aspekte betrachtet, die das mobile Robotersystem zur Interaktion und Kognition befähigen, wodurch dem Nutzer die Möglichkeit gegeben wird, mit dem System zu kommunizieren. Dadurch soll vor allem die Nutzerakzeptanz gegenüber dem Roboter erhöht werden.

Um diese Ziele zu erreichen wurde die Zielsetzung dieses Teilprojekts in vier Teilziele unterteilt. Diese sind:

-
- *Informationsfluss von Mensch zu System („Hin-Kanal“)*
Durch den Informationsfluss von Mensch zu System sollen dem Nutzer robuste und intuitive Benutzereingriffe ermöglicht werden. Diese können einfache Befehle sein, die bspw. zum Stopp des Roboters oder zum Wiederholen einer Tätigkeit führen, aber auch die Eingabe einer Aufgabe an das Planungssystem darstellen. Dazu soll multimodale Sensorik in die mobile Roboter Plattform integriert werden, sodass verschiedene Möglichkeiten zur Informationsübergabe geschaffen werden.
 - *Informationsfluss von System zu Mensch („Rück-Kanal“)*
In diesem Aspekt wird die Informationsvermittlung durch das technische System zum Nutzer betrachtet. Durch einzelne oder kombinierte Signale werden von der Plattform Informationen ausgegeben, um den Nutzer über den Zustand oder die aktuelle Aufgabe des Systems zu informieren. Dadurch soll bspw. erreicht werden, dass sich der Nutzer auf Bewegungen der Plattform einstellen kann.
 - *Erweiterung zum Dialog zwischen den Ressourcen*
Die Informationsflüsse über den Hin- bzw. Rück-Kanal stellen vorrangig Monologe dar, bei denen Informationen in eine Richtung übergeben werden. Aufbauend darauf soll das Robotersystem zu einem Dialog befähigt werden, wobei dieser durch direktes Feedback auf eine Aktion durch einen der Interaktionspartner gekennzeichnet ist.
 - *Befähigung der Roboter zur Kognition*
Neben den Interaktionsfähigkeiten, sollen in diesem Teilprojekt auch kognitive Fähigkeiten des Robotersystems betrachtet und erweitert werden, sodass sich das System in gewissem Maße an den Nutzer und seinen aktuellen Zustand anpassen kann. Dazu werden die Bewegungen des Menschen aufgenommen und interpretiert.
 - *Ad-hoc Situationen und Interaktion*
Die beschriebenen Teilaspekte zur Befähigung des Roboters zur Kommunikation bzw. Kognition sollen zusammengefasst dazu dienen, eine ad-hoc Kooperation zwischen Mensch und Roboter zu ermöglichen. Diese kann nur dann gelingen, wenn beide Partner Informationen an den anderen übergeben können, weshalb die genannten Bereiche der Interaktion die Voraussetzung für den Eingang in eine ad-hoc Kooperation darstellen. Im zweiten Zwischenbericht wurde dargestellt, für welche Situationen die Interaktionsfähigkeiten genutzt werden können. Auf Hinweise der Gutachter hin, wurden im dritten Projektjahr im Rahmen eines Workshops die ad-hoc-Szenarien basierend auf dem Use Case evaluiert. Dabei wurde festgestellt, dass entweder der Mensch oder das Robotersystem eine ad-hoc Anfrage stellen können. Es existieren folgende Möglichkeiten:
 - 1) Mensch startet einen ad-hoc Auftrag
 - a. Anhalten des Roboters: Pausieren, Auftrag prüfen
 - b. Sonderauftrag eingeben, Werkzeug/Bauteil abholen oder Teamaufgabe starten sowie Aufgabe als erledigt markieren
 - 2) Robotersystem startet ein ad-hoc Auftrag
 - a. Fehlerfälle

Die nachfolgende Abbildung 47 zeigt die Möglichkeiten der ad-hoc Kooperation, welche Interaktionsmöglichkeiten dafür zur Verfügung stehen und wie die Verknüpfung mit dem PPS-System abgebildet ist.

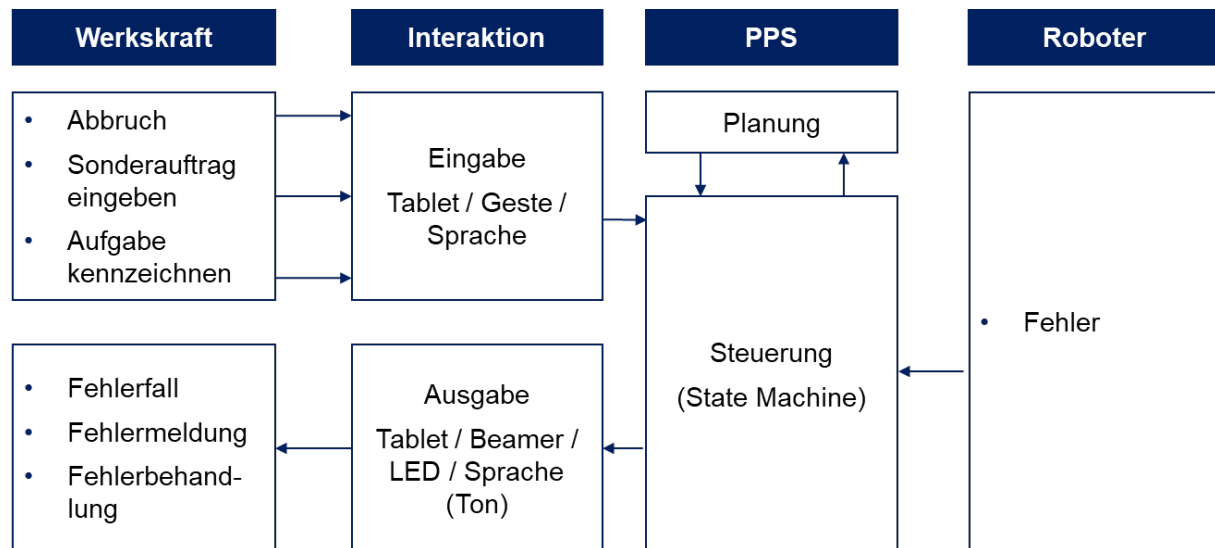


Abbildung 47: Graphische Darstellung von System mit ad-hoc Fähigkeiten

Ausgehend von diesen Erkenntnissen zur Struktur der Interaktionssysteme im Zusammenhang mit der ad-hoc Kooperation wurden die Interaktionsmöglichkeiten daraufhin weiterentwickelt. So wurde beispielsweise im Tablet die Möglichkeiten zur Ausgabe des Fehlerfalls oder zur Eingabe eines Sonderauftrags vorgesehen. Die Details sind in den Arbeitspaketen beschrieben.

4.4.3 Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss

Arbeitspaket 4.1: Anforderungen und Realisierung eines Kanals für den Informationsfluss von Mensch zu System („Hin-Kanal“)

Gemäß der Zielstellung wurden in diesem Arbeitspaket Benutzereingriffsmöglichkeiten untersucht und erweitert, um Informationen vom Nutzer an das System zu übergeben. Dies können einfache Befehle, das Einlernen einer Aufgabe oder die Übermittlung einer Aufgabe an das Planungssystem sein.

Arbeitspaket 4.1.1: Benutzereingriffsmöglichkeiten zur direkten Eingabe von Anweisungen

Für eine erfolgreiche Kooperation von Mensch und Roboter ist eine geeignete Interaktion zwischen den beiden Partnern notwendig. Dazu gehört, dass der Mensch dem Roboter über einfache Befehle, die keiner Expertenkenntnis bedürfen, Anweisungen geben kann. In diesem Arbeitspaket wurden hierfür Möglichkeiten zur direkten Eingabe von Anweisungen betrachtet, die bereits teilweise erprobt und implementiert wurden. Aus der Analyse der Use Cases wurde die Notwendigkeit für Eingabemöglichkeiten in unterschiedlichen Situationen abgeleitet. Die Aufgabenfelder für eine Eingabe von Anweisungen umfassen:

- Unterstützung durch Roboter ad-hoc anfragen

- Möglichkeit zum Pausieren des Roboterprogramms, bspw., weil Roboter im Weg steht
- Beeinflussung des Fahrtwegs des Roboters
- Eingabe der Änderung eines Auftrags (Regallagerkommissionierung)
- Möglichkeit zur Programmierung von komplexeren Abläufen

Die ersten vier Punkte werden durch Eingabesysteme betrachtet und teilweise umgesetzt, die in diesem Arbeitspaket beschrieben werden. Dazu zählen eine Gestensteuerung, der Einsatz eines Eye-Tracking-Systems, eine Sprachsteuerung und ein Tablet. Die Möglichkeit zur Programmierung von komplexeren Arbeitsabläufen wird in den Arbeitspaketen 4.1.2, 4.2.2, 4.3.1 und 4.4.1 beschrieben.

Gestik wurde im ersten Projektjahr als eine Art zur Kommunikation mit einem technischen System identifiziert. Damit können vorrangig das Pausieren des Roboters und die Beeinflussung des Fahrtwegs teilweise abgedeckt werden. Gleichzeitig wurde in TP 5 eine Studie durchgeführt, um zu untersuchen, welche Gesten als intuitiv gelten und damit leicht erlernbar und ausführbar sind. Basierend auf dieser Studie wurden die identifizierten Gesten „Stopp“, die Richtung anzeigen, eine „Komm-her“-Geste und eine „Weiter“-Geste im System im zweiten Projektjahr implementiert. Diese vier implementierten Gesten wurden in einer Studie, die Ende des Jahres 2018 durch TP 5 durchgeführt wurde, auf Robustheit hin evaluiert. Im zweiten Projektjahr wurden die vier Gesten mittels einer Kinect-Kamera und deren Software-Bibliothek implementiert. Da die Kinect nicht weiterhin vertrieben und unterstützt werden soll, wurde im dritten Projektjahr eine weitere Softwarelösung identifiziert: OpenPose ermöglicht es, das menschliche Skelett aus einem Webcam-Stream zu erkennen. Mit Hilfe des Deep Learning Algorithmus LSTM wurden Gesten bis zu 91 % richtig erkannt. Neben der Gesteneingabe mit den Händen, wurde ein Eye-Tracking-System untersucht, mit dessen Hilfe eine Werkskraft über längeres Anschauen bzw. Blinzeln den Roboter einen Befehl zum Stoppen bzw. Weiterfahren geben konnte. Diese Eingabemöglichkeit funktionierte zwar, jedoch wurde zunächst keine nähere Anwendung dafür ermittelt. Im dritten Projektjahr wurde der Ansatz jedoch wieder aufgegriffen, um den Roboter in Interaktionsbereitschaft zu setzen. Dies ist in Abschnitt 4.2.3 beschrieben.

Im dritten Projektjahr wurden die Eingriffsmöglichkeiten durch Gesten um Spracheingabe und das Tablet erweitert, für das im zweiten Projektjahr bereits ein Konzept erarbeitet wurde. Für den Menschen ist das Sprechen die einfachste Art und Weise, wie er mit anderen Menschen kommunizieren kann. Zunächst wurde die Kommunikationsform „Sprache“ im Projekt nicht vertieft betrachtet, da im Produktionsumfeld von Lärm auszugehen ist. Da jedoch bei den Anwendungsfällen feststellbar war, dass der Einsatz auch in einer ruhigen Umgebung, z.B. im Regallager von Mey Maschinenbau, stattfinden kann, wurde Sprache im dritten Projektjahr als Eingabemedium für die Eingabe eines ad-hoc Auftrags identifiziert.

Über das Tablet, dessen Konzept im zweiten Zwischenbericht beschrieben wurde, kann der Mensch aktuelle Aufgaben einsehen und neue Befehle für ad-hoc Aufgaben eingeben, siehe . Im Tablet wird der ad-hoc Auftrag „Objekt holen“ als Beispiel durch die Firma Teamware GmbH implementiert. Es kann bspw. ein Bauteil mit zugehörigem Zielort eingegeben werden.

Auch die Spracheingabe ist für eine Anfrage zur Unterstützung durch Roboter einsetzbar. Bei der Regallagerkommissionierung ist es möglich, dass der Roboter schon im Regallager steht und eine Werkkraft nun ebenfalls einen Auftrag hat, ein Objekt aus dem Lager zu holen. Da das Regallager zu diesem Zeitpunkt durch den Roboter blockiert ist, kann der Mensch den Auftrag an den

Roboter weitergeben. Für dieses Szenario sind die Spracheingabe sowie das Tablet als Eingriffsmöglichkeiten geeignet.

Durch einen Sprachassistenten ergibt sich eine neue Möglichkeit der Kommunikation zwischen Mensch und Roboter. Der Roboter kann durch ein Gespräch angewiesen werden komplizierte Vorgänge auszuführen, ohne dass dafür durch ein Menü geklickt werden muss. Da keine Hände zur Sprachsteuerung verwendet werden, eignet sich diese Art der Steuerung vor allem für Robotersysteme, die in Montagesituationen eingesetzt werden, bei der die Hände einer Werkkraft

nicht frei sind. Als Beispiel kann der Fall einer Werkkraft betrachtet werden, welche gerade ein Werkstück montiert. Falls Materialien aus dem Lager benötigt werden, kann die Arbeitskraft ihre Arbeit unterbrechen und selbst ins Lager gehen, oder kann den Roboter dazu anweisen. Für die Anfrage an das Lager müssen die benötigten Objekte sowie deren Anzahl bekannt sein. Mit klassischen Eingabemöglichkeiten muss die Werkkraft ihre Arbeit unterbrechen, bei Kommunikation über Sprachsteuerung ist dies nicht notwendig.

Es wurde prototypisch ein System entwickelt, in dem der Mensch einen neuen Auftrag sprachlich an den Roboter kommuniziert. Ein Mensch soll einen Sprachbefehl so

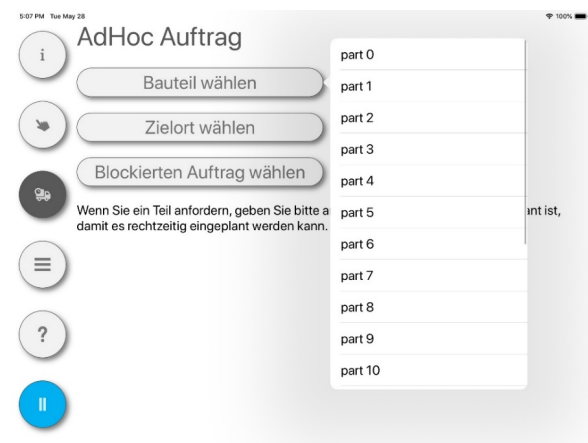


Abbildung 48: Eingabe der ad-hoc Aufträge durch Tablet

natürlich wie möglich in das System eingeben können, wie etwa „Bring mir 10 Schrauben.“ oder „Kannst du mir 10 Schrauben aus dem Lager holen?“. War das System nicht in der Lage bestimmte Informationen vollständig aufzunehmen, soll es explizit und direkt nachfragen. Damit das System nicht auf ungewollte Eingaben, wie z.B. Produktionslärm oder ein Gespräch zwischen zwei Menschen, reagiert, wird ein Hotword-System verwendet. Damit reagiert das System erst auf Spracheingaben, nachdem ein bestimmtes Wort gesagt wurde. Das System soll dabei vollständig auf dem mobilen Roboter laufen und der Benutzer soll keine zusätzliche Hardware bei sich tragen müssen, um mit dem Roboter reden zu können, da dies die Akzeptanz des Benutzers gegenüber dem Robotersystem verringern würde. Außerdem muss das System ohne Internetverbindung funktionieren. Zurzeit gibt es mehreren Sprachassistenten auf dem Markt, unter anderem Alexa von Amazon oder Siri von Apple. Beide Systeme bestehen aus einer Reihe von Sub-Systemen und funktionieren nach dem gleichen Ablauf, wie in Abbildung 49 dargestellt.

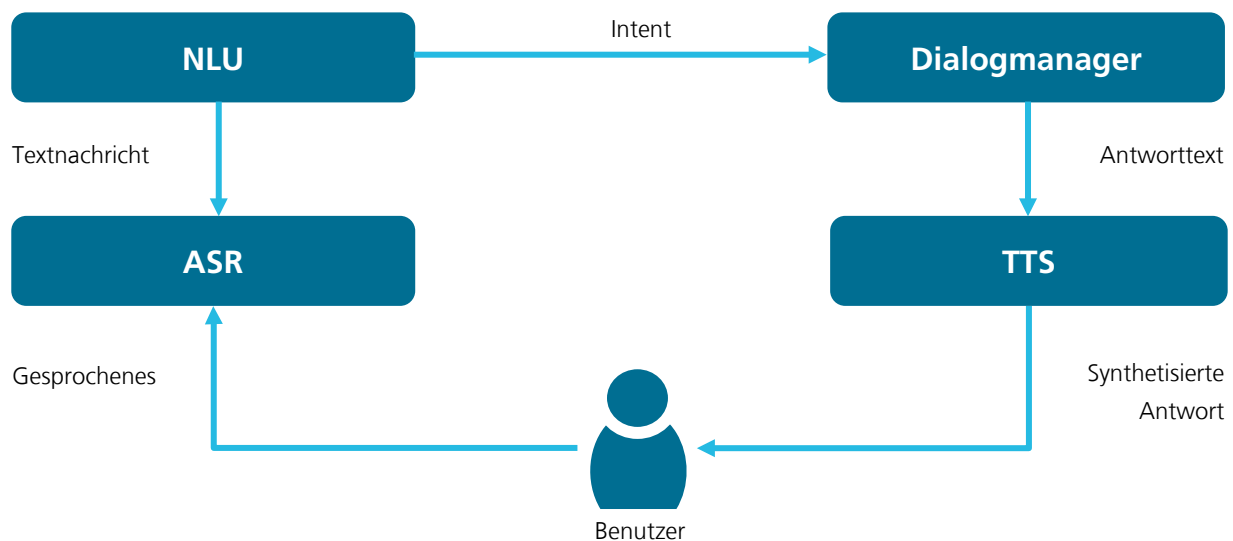


Abbildung 49: Ablauf eines Sprachassistenten

Das System wird durch das Hotword-System aktiviert. Nach dem Aktivieren durch das Hotword ist das Automatic Speech Recognition (ASR) System für die Übertragung des Gesprochenen in das Schriftliche zuständig. Dabei wird das Gesprochene in Phoneme aufgeteilt. Phoneme sind kleinste lautsprachliche Einheiten der menschlichen Sprache, z. B. das „b“ in „Bein“ im Unterschied zu p in „Pein“. Nachdem das Gesprochene in einen Text umgewandelt wurde, liegt ein Transkript vor. Damit dieses Transkript erkannt wird, werden Systeme aus dem Natural Language Understanding (NLU) verwendet. Diese analysieren den Text und versuchen die Absicht (Intent) des Sprechers zu erkennen. Wie in Abbildung 50 abgebildet, erkennt das System mit Hilfe des Intents die Bedeutung des Gesagten. Anschließend muss entschieden werden, wie das System reagiert, wofür der Dialogmanager zuständig ist. Dieser beinhaltet den aktuellen Zustand des Gesprächs und entscheidet, welche Antwort an den Benutzer zurückgegeben wird. Wenn der Dialog Manager der Antwort an den Benutzer zurückgeben möchte, wird das Text-to-Speech (TTS) System verwendet. Dieses nimmt einen Text entgegen und wandelt diesen in eine Audioausgabe um. Ein TTS-System besteht im Wesentlichen aus drei Teilen: Symbolverarbeitung, Verkettung und akustischer Synthese.

request_object

Hole mir **fünfzehn** Schrauben, **acht** Motoren und **Kreuzschrauben**
 Ich brauche **Schrauben**, **Motoren** und **Mütter**

Abbildung 50: Beispielsätze und die Slot-Werte, wie sie für den Intent „request_object“ mit Snips definiert werden

Snips ist ein Sprachassistenten-System, welches eine eigene Hotword-Engine sowie eine Automatic Speech

Recognition Engine und Natural Language Understanding Engine beinhaltet. Für das Umwandeln von Text in eine Audio-Datei wird von Snips die Text to Speech Engine „picotts“ verwendet. All diese Systeme benötigen für die Ausführung keine Internetverbindung und wurden so entworfen, dass sie auch auf Hardware mit einer geringen Rechenleistung, wie z.B. einem Raspberry Pi, ausgeführt werden können. Snips benötigt Trainingsdaten, die über die Snips-Website erstellt werden können, damit es Intents und Slots erkennen kann. Die Trainingsdaten werden verwendet, um neben den Intents auch die Automatic Speech Recognition Engine zu trainieren. Dadurch kann

die ASR nur Wörter erkennen, die in Beispielsätzen vorhanden sind, dafür kann sie jedoch auch auf Hardware mit niedriger Leistung ausgeführt werden. Wenn das Training abgeschlossen ist, kann Snips ohne Internetverbindung betrieben werden. Damit es möglich ist, eine Sprachsteuerung zu entwickeln, muss auf der Webseite von Snips ein Benutzerkonto angelegt werden. Danach können die Intents und Slots definiert werden. Dafür werden, wie in Abbildung 6 dargestellt, Beispielsätze definiert. In Abbildung 6 repräsentieren die farbig hinterlegten Wörter die Slot-Werte. Im Beispiel werden zwei verschiedene Slot-Werte verwendet. Die definierten Intents für den Use Case werden in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 5: Liste der erstellten Intents

| Intent-Name | Beispielsatz |
|-------------------------------|-------------------------------|
| start_order | Bring mir etwas aus dem Lager |
| request_object | Bring mir zehn Schrauben |
| check_battery_level | Wie voll ist deine Batterie |
| Confirm | Das war alles |
| request_information | Was kann ich alles machen |
| specific_request_object_count | Bring mir zwanzig Stück |
| specific_request_object | Bring mir Motoren |
| Abort | Bestellung abbrechen |

Arbeitspaket 4.1.2: Intuitive Eingabe von Multi-Roboterprogrammen zur Adaption

Für eine zügige Inbetriebnahme eines Robotersystems ist es notwendig, diesem schnell neue Aufgaben beizubringen. Im Szenario dieses Projekt ist es zum Beispiel möglich, dass sich der Durchmesser des Ringes bei der Motormontage kurzfristig verändert und dementsprechend müssen die Jobs bzw. Aufgaben angepasst oder komplett neu programmiert werden können. Die Playback-Roboterprogrammierung kann hierbei dafür verwendet werden, den Manipulatoren einzelne Jobs oder Aufgaben beizubringen, welche dann vom übergeordneten Planungssystem zur Erstellung oder Anpassung von Aufgaben verwendet werden können. Hierzu wurden verschiedene Möglichkeiten zur Eingabe von Multi-Roboterprogrammen betrachtet und evaluiert, um eine schnelle Inbetriebnahme der mobilen Plattformen in der Produktionsumgebung zu gewährleisten.

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, einem (Multi-)Robotersystem schnell und intuitiv neue Aufgaben beibringen zu können. Dabei ist wichtig, dass die Programmierung des Robotersystems ohne Kenntnisse über textuelle Roboterprogrammiersprachen erfolgen soll, damit auch Nicht-Experten in der Lage sind, das Programmiersystem zu verwenden. Hierfür wurden im ersten Projektjahr die Arten der Programmierung exploriert und festgestellt, dass sich die Playback Programmierung für diese Anforderung eignet. Zur Unterstützung von Multi-Robotersystemen wurden drei Möglichkeiten zur Umsetzung der Programmierung nach (Riedl et al. 2016) implementiert. Dabei handelt es sich zum einen um das parallele Programmieren aller beteiligten Roboterarme, indem diese von

je einem Benutzer geführt werden. Weiterhin gibt es noch zwei Möglichkeiten für das sequentielle Programmieren der Roboterarme. Bei der ersten Möglichkeit führt ein Benutzer einen Roboterarm, während die anderen Roboterarme stillstehen. Bei der zweiten Möglichkeit führt der Benutzer einen Roboterarm, während die anderen Roboterarme bereits aufgezeichnete Aufgaben parallel dazu ausführen. Diese Möglichkeiten wurden bereits im ersten Zwischenbericht ausführlich erläutert und sind zusätzlich noch einmal in Abbildung 51 dargestellt.

Im zweiten Projektjahr wurde die Portierung des Programmiersystems von Leichtbaurobotern auf Industrieroboter in Form eines Stäubli TX2-90L vorangetrieben.

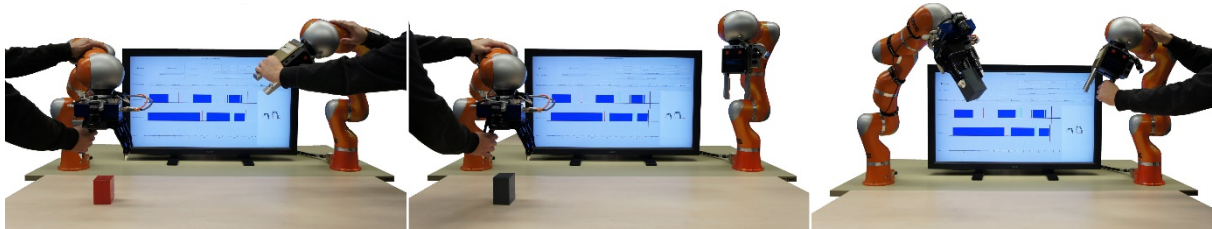


Abbildung 51: Die drei Möglichkeiten der Mehrroboterprogrammierung (Riedl et al. 2016)

Zusätzlich wurde eine Methode entworfen, welche es erlaubt, das Werkzeug bzw. den Greifer, welcher am Flansch eines Roboters montiert ist, zu steuern, während der Roboter geführt wird und ohne das Tasten am Werkzeug angebracht werden. Dabei wird der Endeffektor kurz in und anschließend wieder gegen den Uhrzeigersinn gedreht (geruckelt), so dass ein Schließen bzw. Öffnen des Greifers ausgelöst wird. Dieses Vorgehen funktioniert sehr gut bei Werkzeugen mit binären Zuständen, wie zum Beispiel einfachen Backengreifern. Diese sind entweder geöffnet oder geschlossen und ein Ruckeln am Endeffektor sorgt dafür, dass ein Übergang in den jeweils anderen Zustand ausgelöst wird. Tests haben gezeigt, dass diese Methode gut für Grobbewegungen und Grobplatzierungen von Werkstücken funktioniert. Für präzises Aufgreifen und Ablegen sollte weiterhin auf Tasten am Endeffektor zurückgegriffen werden.

In einer Masterarbeit am Lehrstuhl Angewandte Informatik III der Universität Bayreuth wurde zusätzlich untersucht, wie Kraftverläufe mittels einer zusätzlichen Kraft-Moment-Sensorik per Playback Programmierung dem Roboter beigebracht werden können (Hartwig 2020).

Mit der Umsetzung dieser Punkte wurde das Arbeitspaket im zweiten Projektjahr abgeschlossen, so dass im Rahmen dieses Arbeitspaketes im dritten Projektjahr keine weiteren Arbeiten erfolgt sind.

Arbeitspaket 4.1.3: Befähigung zur manuellen Fernsteuerung und kooperativen Aufgabenerfüllung durch eine agile Teleoperation

Dieses Arbeitspaket untersuchte im Laufe des Projekts die Einsatzmöglichkeiten eines Teleoperationssystems zur agilen, intuitiven Manipulatorfernsteuerung des mobilen Roboters. Gemäß des definierten Use Case findet die Teleoperation innerhalb des Verbundforschungsprojekts FORobotics als Interventions- und Fallback-Lösung im sogenannten Havarie-Szenario Verwendung.

Kann beispielsweise eine Sichtlagerkiste nach mehrfachem Versuch der hinterlegten Prozeduren bzw. autonomen Fähigkeiten nicht erfolgreich aufgegriffen werden oder entsteht ein Fehler während der fahrtbegleitenden Montage bzw. bei einem Bin-Picking Vorgang, war es Ziel des AP eine

Ferninterventionsmethode bereitzustellen. Hierzu schaltet sich ein Operator mittels eines bereitgestellten Augmented Reality-Teleoperationssystems auf die betroffene Plattform auf, bewertet die Situation aus der Ferne sowie löst die Aufgabe handgeführt.

Bei Augmented Reality (AR) handelt es sich ebenso um eine Form der erweiterten Realität. Im Gegensatz zu Augmented Reality (AR) wird allerdings nicht die reale Welt um Informationseinblendungen erweitert, sondern stattdessen eine vollständig virtuell gerenderte Umgebung möglichst echtzeitnah und detailreich um Informationen, Objekte und Zustände der realen Prozessumgebung angereichert. Dies weist für die Teleoperation eine Vielzahl an Vorteilen auf. Die AR wird dabei aus der existierenden Umgebungsmodellierung gespeist.

Das vorliegende Arbeitspaket 4.1.3 adressierte dabei im Laufe der Projektbearbeitung Untersuchungen zur Auflösung bestehender Herausforderungen hinsichtlich folgender Aspekte:

- Datenkompression und Latenzzeitreduktion für eine Teleoperation aus dem Leitstand heraus
- Interoperabilität der Ansteuerung mit unterschiedlichen Roboterherstellern in Kooperation mit Teilprojekt TP 2
- Möglichkeiten zur sensorischen Erfassung und Objektsegmentierung in Kooperation mit TP 2
- Systemfähigkeiten zur automatisierten Bahnplanung (bspw. in Form einer automatisierten Greifbewegungsplanung für das Greifen von durch den Operator selektierten Objekten) sowie
- Untersuchungen hinsichtlich des Technologietransfers der Teleoperation von stationären auf mobile Robotersysteme.

Betrachtungen hinsichtlich einer möglichst intuitiven Steuerung (insbesondere durch eine gesteigerte Operator-Einbindung und Steigerung der Immersion via Force-Feedback, VR-Technologien und Wissensintegration) sowie Untersuchungen hinsichtlich Operator-entlastende Funktionen, werden innerhalb des TP 4 im Arbeitspaket 4.3.2 adressiert.

In den ersten beiden Projektjahren lag der Fokus der Untersuchungen konkret auf den folgenden Forschungsfragen:

- Umgebungserfassung (sensorische Erfassung durch mehrere sich ergänzende 3D-Sensoren, die Sensorkalibrierung bzw. Referenzieren zum Roboter und Segmentierung von 3D-Sensordaten),
- Verbesserung einer bestehenden Fernsteuerung (Datenkompression, Reduktion von Latenzzeiten sowie Optimierung der Bewegungsausführung),
- Erweiterung der Architektur um ROS als Basis für weitere Untersuchungen hinsichtlich Interoperabilität sowie die Verwendung gängiger Algorithmen der Robotik (ROS-Packages),
- Erweiterung des Staubli-ROS-Packages zur Realisierung der direkten Handführung des Manipulators durch den Operator sowie Konzeptentwicklung und Vorbereitung des Technologieübertrags auf Yaskawa-Robotersteuerungen, sowie
- Systemfähigkeit zum dynamischen Umschalten zwischen Handführung und automatisierter Bahnplanung für das Bereitstellen erweiterter Funktionalitäten (wie bspw. Operatorentlastung durch Teilautomatisierung).

Hierbei wurde eine Umgebungserfassung basierend auf der Fusion mehrerer Kinect2 Kameras erzielt. Neben der automatisierten Kalibrierung und Referenzieren der Kameras zum Roboterkoordinatensystem, war ein wesentliches Ergebnis die Segmentierung bekannter statischer Objekte aus den 3D-Punktwolken, wodurch sich die Punktwolken-Datenmenge reduziert und sich ebenso die Latenzzeiten reduzieren. Evaluieren konnte das Ergebnis durch eine erfolgreiche Teleoperation aus der Ferne von 200km über eine übliche Internetverbindung mit Bandbreiten im Bereich von unter 10Mbit/s (vgl. Kohn et al. 2018).

Bezüglich der ROS-Erweiterung konnte eine Integration von ROS in das bestehende System erzielt werden. Einschränkungen bestanden jedoch seitens des ROS-Stäubli-Packages, welches nicht die für die direkte Handführung des Toolcenters erforderliche Standardbefehlssätze bereitstellt. Die direkte Handführung des Manipulators befähigt den Operator dazu, eine feinfühligke, kontinuierliche Teleoperation durchzuführen, wodurch auch komplexe Aufgaben wie das Führen eines Prozesswerkzeugs aus der Ferne teleoperativ durchgeführt werden kann. Die gegebenen Standardfunktionalitäten von ROS/MoveIt! und den zugehörigen ROS-Treibern für Industrieroboter eignen sich jedoch nur bedingt für eine solche agile Teleoperation, da ein dynamisches Beeinflussen bzw. Verändern der Bewegung nicht möglich ist. Um die Vorteile von ROS/MoveIt! (u. a. kollisionsfreie Bahnplanung) und der direkten Handführung ausnutzen zu können, wurde eine eigene Schnittstelle „Robot Control Interface“ in Kooperation mit Teilprojekt TP 2 implementiert, die als weitere Abstraktionsschicht zwischen ROS und der Robotersteuerung dient. Diese beinhaltet einen Positionsregler basierend auf „Velocity“-Vektoren, der parallel zur bestehenden ROS/MoveIt!-Pipeline aktiviert werden kann. Ebenso wurde auch das Stäubli-ROS-Package um die Ansteuerung durch iterativ im Interpolationstakt der Robotersteuerung übermittelter Geschwindigkeitsvektoren (Stäubli „Velocity“-Mode) erweitert.

Ergänzt und abgeschlossen wurde die Schnittstelle mit der Fähigkeit dynamisch zwischen Handführung und ROS-Bahnplanung umschalten zu können. So kann beispielsweise basierend auf einer automatischen Erkennung neuer 6D-Soll-Posevorgabe im Nahbereich zur aktuellen Ist-Pose des Endeffektor via Handführung direkt teleoperiert sowie im Fall weiter entfernter Soll-Posevorgaben über die ROS/MoveIt!-Pipeline mittels kollisionsfreier Bahnplanung bewegt werden. So kann ein erkanntes Objekt in der Ferne markiert und automatisiert angefahren werden.

Die nachfolgende Abbildung stellt schematisch das Prinzip der beiden beschriebenen Bewegungsmodi in zwei Szenarien vor. Szenario (A) zeigt das Setzen einer weiter entfernten 6D-Soll-Zielpose durch den virtuellen Greifer (links) sowie die resultierende MoveIt!-geplante und ausgeführte Trajektorie in rviz (rechts). Szenario (B) veranschaulicht das direkte Handführen im Nahbereich mittels Velocity-Vektorsteuerung im Interpolationstakt der Robotersteuerung.

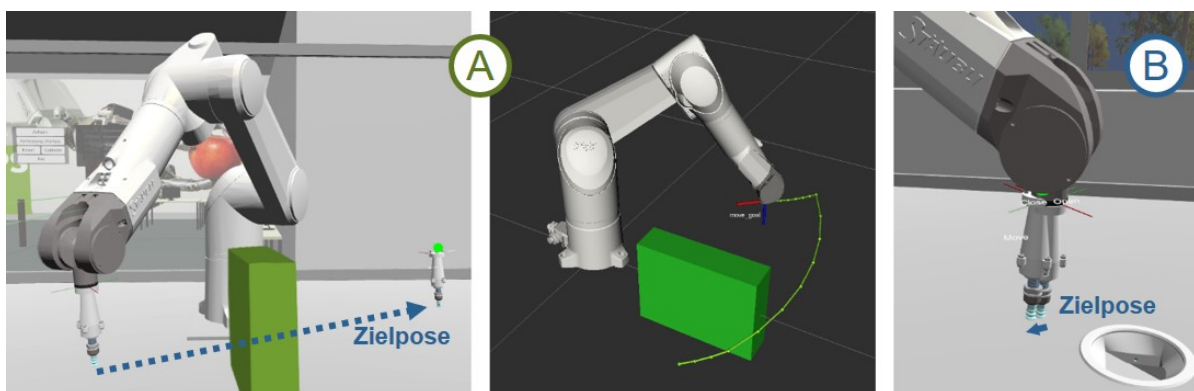


Abbildung 52: Gegenüberstellung der Modi MoveIt!-kollisionsfreie Bahnplanung (A) zu Handführung im Nahbereich (B)

Aus den Ergebnissen der ersten beiden Projektjahre leiteten sich weitere offene Untersuchungen ab. Wesentlich war dabei insbesondere der Übertrag der bisher erschlossenen Teleoperationstechnologien auf die mobile Plattform. Hierzu wurden daher die beiden folgenden, abschließenden Forschungsfragen adressiert:

- Untersuchung und Anpassungsprogrammierung des Yaskawa MotoROS-Packages sowie
- Integration der mobilen Plattform in Unity3D und in die Augmented Reality Umgebung.

Untersuchung und Anpassungsprogrammierung des Yaskawa MotoROS-Packages

Da Yaskawa Robotersteuerungen keine direkte Geschwindigkeitsvektorensteuerung vorsehen, war die Grundidee der Untersuchungen diese zu imitieren. Zum Einsatz kam der Yaskawa Befehlssatz „incremental move“, also eine vektorielle Bewegungssteuerung im Interpolationstakt (IPO). Hierzu war eine Umrechnung der kommandierten Geschwindigkeit in relative Bewegung (Inkrement) für eine Interpolationsperiode sowie die Ausführung im IPO der Steuerung YRC1000 von 4 ms erforderlich. Als herausfordernd stellte sich dabei heraus, dass in MotoPlus implementierte Standard-Tasks nicht echtzeitfähig sind. Dies stellt allerdings eine Voraussetzung für eine kontinuierliche, "ruckelfreie" Bewegung des Roboters bei der Geschwindigkeitsvektoren-basierten Handführung dar. Daher wurde ein echtzeitfähiger Motion Control Task erstellt. Für den Regelkreis der Teleoperation war zudem ein echtzeitfähiges Feedback der Ist-Position seitens des YASAKWA Treibers erforderlich. Daher wurde die Priorität der Feedback-Task erhöht und das Feedback wird nun im IPO-Takt "gestreamt". Um ruckartige Bewegungen zu vermeiden wurde zudem eine Filterung der Velocity-Befehle untersucht und implementiert. Ein Mittelwertfilter (moving average filter) dient hierbei zur Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsbegrenzung.

Da der MotoROS-Treiber nach wie vor den normalen JointTrajectory-Modus unterstützen sollte, wurde im Treiber eine StateMachine implementiert. Diese läuft nun fortan in einem eigenen Thread und ermöglicht von dort das Starten und Beenden der entsprechenden Modi. Um den Desktop-PC-seitigen Treiber nicht abändern zu müssen, schaltet die StateMachine automatisiert, je nach empfangenem Message-Typ zwischen den Modi um.

Bis zum Projektabschluss im Jahr 2020 werden die MotoROS-Erweiterungen noch ausgiebig getestet sowie optimiert. Anschließend erfolgt im Rahmen einer Publikation die Bereitstellung des angepassten Treibers über die github-Plattform.

Integration der mobilen Plattform in Unity3D und in die Augmented-Virtuality-Umgebung

Folgende Abbildung 53 zeigt das Ergebnis der Integration der mobilen Roboterplattform MR-HC10 in Unity3D sowie die Augmented-Virtuality-Umgebung.

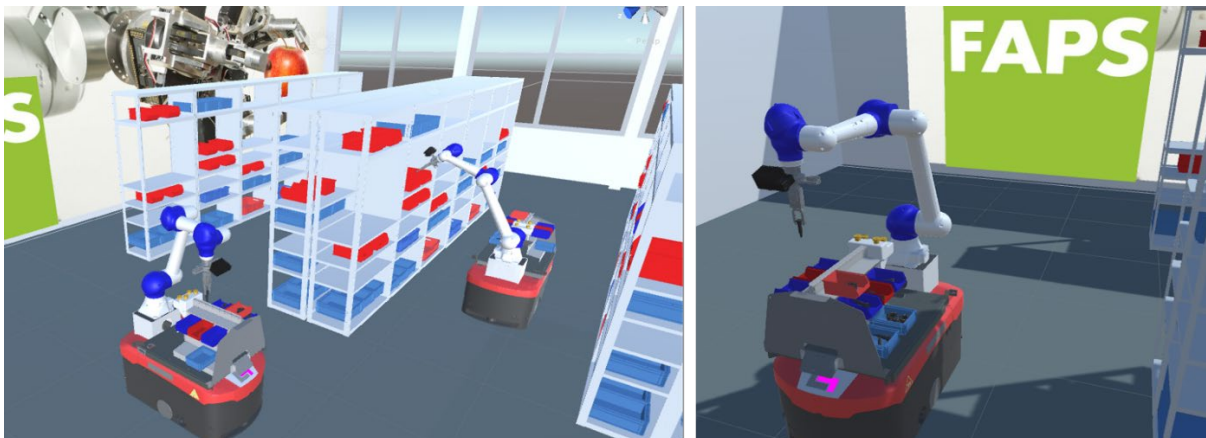


Abbildung 53: In Unity3D und die Augmented Virtuality (AV) eingebundene mobile Roboterplattform MR-HC10

Neben der Modellierung der Plattform und des Manipulators sowie deren Bewegungsmöglichkeiten innerhalb von Unity3D, wurden insbesondere die Datenübertragung der 3D-Kameras der mobilen Plattform über WLAN von der mobilen Plattform an den Teleoperationsleitstand untersucht. Hier kamen bereits innerhalb von FORobotics entwickelte Vorsegmentierungs- und Bandbreitenreduktionsalgorithmen (Kohn et al. 2018) zum Einsatz. Ebenso zum Einsatz kam die im ersten Projektjahr innerhalb von TP 2 entwickelte Kamerareferenzierungsmethode auf Basis von ArUco-Makern. Wesentlich für den erzielten Erfolg bei der Integration der realen Plattform und deren Umgebung war zudem die von TP 2 bereitgestellte lokale Umgebungsmodellierung. Zur Ansteuerung der Plattform sowie derer Betriebsmittel wurde auf die elementaren Fähigkeiten von TP 1 und TP 2 zurückgegriffen.

Im Rahmen der Abschlussbegutachtungen werden die Ergebnisse am Gesamtdemonstrator vorgestellt. Das Teleoperationssystem wird hier beispielhaft als Interventionssystem im Fehlerfall eingesetzt werden.

Arbeitspaket 4.2: Umsetzung eines Kanals als Informationsfluss von System zu Mensch („Rück-Kanal“)

In diesem Arbeitspaket stand die Darstellung von Informationen des technischen Systems gegenüber dem Nutzer im Vordergrund. Durch die Informationsübergabe an den Nutzer soll es diesem ermöglicht werden, sich auf Aktionen des Robotersystems einstellen zu können, was zu einer höheren Nutzerakzeptanz führen soll. Informationen können dem Nutzer auf multimodale Weise, akustisch, visuell oder haptisch dargestellt werden. Ziel war es daher, verschiedene Möglichkeiten der Informationsdarstellung zu untersuchen und geeignete Darstellungsweisen zu implementieren.

Arbeitspaket 4.2.1: Untersuchung multimodaler Darstellungsweisen des Systemzustands

Ziel dieses Arbeitspakets war die Untersuchung von multimodalen Darstellungsweisen, um dem Nutzer Informationen über den Systemzustand des Robotersystems zu übermitteln. Bei multimodalen Ausgabegeräten handelt es sich um Technologien, bei denen Informationen über mehrere Sinneswahrnehmungen übertragen werden. Im ersten Projektjahr wurden Technologien zur Darstellung des Systemzustands untersucht und eine Darstellung mittels Projektor wurde prototypisch umgesetzt, wobei die aktuelle Fahrtrichtung des Roboters und das Ziel durch einen Projektor angezeigt wurden. Die Projektion von Informationen auf den Boden vor den Roboter wurde über das Projekt beibehalten. Neben der Anzeige der Fahrtrichtung durch den Projektor, wird seit dem dritten Projektjahr als Unterstützung für die Spracheingabe verwendet. So kann das System Dinge, die es verstanden hat, auf dem Boden anzeigen, sodass der Mensch zusätzlich zur Sprache über einen weiteren Kanal feststellen kann, ob das System das richtige verstanden hat.

Da festgestellt wurde, dass die mit Hilfe des Projektors angezeigten Informationen nicht ausreichend sind, um dem Mitarbeiter genügend Informationen zum aktuellen Auftrag zu geben, wurde im zweiten Projektjahr ein Touch-Bildschirm als eine weitere Darstellungsweise identifiziert. Ein Konzept wurde gemeinsam mit TP 5 nach Usability-Richtlinien im zweiten Projektjahr erarbeitet und ist im zweiten Zwischenbericht beschrieben.

Im dritten Projektjahr wurde die Tablet-Applikation zur Anzeige von Informationen durch die Firma Teamware GmbH implementiert. Die detaillierte Implementierung wird im Arbeitspaket 4.2.3 be-

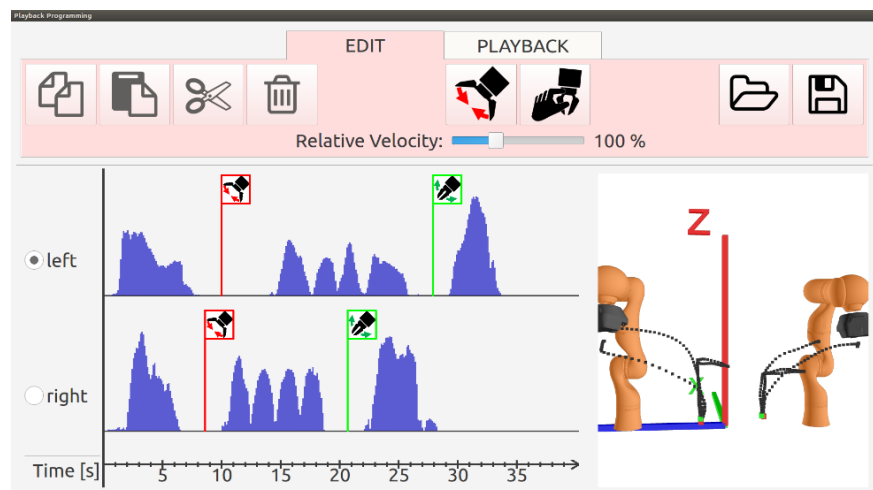
schrieben. Des Weiteren wurde ein Konzept zur Unterstützung des Menschen in einer Hilfesituation des Roboters entwickelt, das eine Art Tutorial für den Menschen darstellt. Dieses wird ebenfalls mit Hilfe des Tablets angezeigt. Eine detaillierte Beschreibung dazu findet sich in AP 4.4.4.

Statusinformationen und Hilfestellungen können auch über eine Audioausgabe gegeben werden. Wie in Arbeitspaket 4.1.1 beschrieben, kann die Antwort bei einem Sprachsteuerungssystem an den Benutzer durch einen Lautsprecher zurückgegeben werden. Genauer gesagt wird der Text durch das „Text-to-Speech“(TTS) in eine Audioausgabe umgewandelt. Die Audioausgabe dient dazu, die eingesprochene Anforderung zu wiederholen und die proaktive Hilfestellung anzubieten.

Arbeitspaket 4.2.2: Graphische Darstellung von Multi-Roboter-Programmen

Nachdem in AP 4.1.2 das Programmieren von (Multi-)Robotersystemen behandelt wurde, welches dazu dient, (mobile) Robotersysteme schnell in Betrieb nehmen zu können bzw. auf veränderte Umgebungen reagieren zu können, wird in diesem Arbeitspaket eine graphische Darstellung dieser Programme entworfen. Diese soll es dem Bediener ermöglichen, im späteren Verlauf die erstellten Programme zu modifizieren und zu erweitern, damit auch komplexere Jobs bzw. Aufgaben schnell programmiert und somit dem Planungssystem zur Verfügung gestellt werden können. Die an den Plattformen installierten Tablets können zum Aufrufen, Anzeigen und Bedienen des in diesem Arbeitspaket entwickelten graphischen Programmiersystems verwendet werden. Dabei wird der Fokus auf die intuitive und schnelle Bedienbarkeit der Benutzeroberfläche gelegt. Im ersten Projektjahr wurde eine graphische Benutzeroberfläche in Anlehnung an Videoschnittprogramme entworfen, welche es dem Bediener erlaubt, einen schnellen Überblick über das vorhandene Programm zu erhalten, indem zum einen das Programm als Geschwindigkeitsprofil mit Werkzeugbefehlen entlang einer horizontalen Zeitachse angezeigt wird und zum anderen in einem dreidimensionalen Vorschauenfenster das Robotermodell und die Roboterbahn angezeigt werden. Zusätzlich wurde diese Benutzeroberfläche von der Universität der Bundeswehr München heuristisch evaluiert, um Schwachstellen zu finden und diese verbessern zu können. Im zweiten Projektjahr wurden die Ergebnisse dieser Evaluation verwendet, um die Benutzeroberfläche intuitiver zu gestalten. Die daraus entstandene, überarbeitete Benutzeroberfläche ist in Abbildung 54 zu sehen.

Abbildung 54: Stand graphische Benutzeroberfläche zur Darstellung und Programmierung mehrerer Roboter nach der ersten Überarbeitung.



Die Oberfläche ist in drei Teile aufgeteilt, die Kontrollleiste mit Editier- und Abspielmodus, die Zeitleisten mit einer Darstellung der Programme in Form eines Geschwindigkeitsprofils des Tool Center Points und einem dreidimensionalen Vorschaufenster mit der Visualisierung des Programms und der Roboter. In einer Projektarbeit am Lehrstuhl Angewandte Informatik III der Universität Bayreuth wurde anschließend diese Benutzeroberfläche um Konzepte für berührungsempfindliche Bildschirme erweitert und die Interaktion zwischen Benutzer und Programmiersystem überarbeitet (Siegl 2019).

Im dritten Projektjahr wurde mit Hilfe von Industriedesignern der Krones AG die graphische Benutzeroberfläche zur Steigerung der Intuitivität weiter verbessert. Das Ergebnis ist der Entwurf einer Schnittstelle für das intuitive Roboterprogrammiersystem, das über einen Touchscreen gesteuert wird. Für die Gestaltung des Systems wurde ein nutzungsorientierter Gestaltungsprozess angewendet. Dieser ist in die Phasen Analyse, Gestaltung und Evaluierung eingeteilt. In der Analysephase werden verschiedene Systeme aus dem Bereich der Video- und Audibearbeitung getestet. Das Thema Intuitivität im Kontext der Mensch-Technik-Interaktion wurde nach den Publikationen der IUUI Research Group aufgegriffen (Mohs et al. 2006).

Die Entwurfsphase für die graphische Darstellung von Multi-Roboter-Programmen befasste sich mit der Übertragung von Anforderungen aus der Analysephase auf eine Interaktionsplattform (Zühlke et al. 2012). Die Umsetzung des Designs hat dabei das Ziel, eine intuitiv bedienbare Oberfläche zu entwickeln. Zu diesem Zweck werden für die Darstellung des Playback Programmiersystems ein Papierprototyp und ein interaktives virtuelles Mockup erstellt.

Die Benutzeroberfläche ist der Bedienung von Textverarbeitungssoftware (z. B. Microsoft Word, Open Office Writer) nachempfunden. Die Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit entspricht der Norm DIN EN ISO 9241-110. In das Design wurden mehrere Dialogprinzipien aufgenommen. Der Aspekt *Erwartungskonformität* wurde durch die Implementierung bekannter Konventionen in der Symbolleiste umgesetzt und Symbolen, die den Funktionen der Textverarbeitungssoftware entsprechen. Der Aspekt *Selbstbeschreibungsfähigkeit* wurde durch Elemente umgesetzt, die non-verbal kommuniziert werden können. So werden auf den Schaltflächen der Symbolleiste nur Symbole angezeigt. Der Aspekt *Aufgabenangemessenheit* wurde von aktiven Schaltflächen übernommen, die deutlich sichtbar sind, und Schaltflächen wie *Einfügen*, die nur angezeigt werden, wenn ein Abschnitt eines aufgezeichneten Roboterprogramms entlang einer Zeitachse in die Zwischenablage kopiert wurde.

Zur Evaluation wurde ein Papierprototyp erstellt, welcher mit Hilfe einer heuristischen Evaluation ausgewertet wurde. Der Papierprototyp ist in Abbildung 55 links dargestellt. Die Ergebnisse dieser heuristischen Evaluation wurden verwendet, um in der zweiten Iteration des Gestaltungsprozesses ein interaktives, virtuelles Mockup zu erstellen. Dieses ist in Abbildung 55 rechts dargestellt.

Die neue Oberfläche besteht aus einer Symbolleiste mit Funktionen. Die Funktionen sind unterteilt in Dateiverwaltungsfunktionen (neue Datei, Datei öffnen, Datei speichern), Rückgängig- / Wiederherstellungsfunktionen, Bearbeitungsfunktionen (Kopieren, Einfügen, Ausschneiden, Löschen) und den Sonderfunktionen *Schleifen* und *Verzweigungen* (Riedl et al. 2019). Bei der Aufnahme eines neuen Programms in der Zeitleiste wechselt die Oberfläche in den Aufnahmemodus und der Roboter wird durch Handführung programmiert. Die Schaltfläche zum Öffnen des Greifers ist nur aktiv, wenn der Greifer des Roboters geschlossen ist, und die Schaltfläche zum Schließen des Greifers ist nur aktiv, wenn der Greifer des Roboters geöffnet ist.

Auch in der zweiten Iteration wurde die Oberfläche nach DIN EN ISO 9241-110 und den Gestaltungsgesetzen aus der Analysephase entworfen. Die Erwartungskonformität wurde durch Ändern des Vokabulars weiterentwickelt, sodass Begriffe aus der Informationstechnologie (z. B. „Capture Stimulus“) in alltägliche Begriffe geändert wurden („Bild aufnehmen“). Die Selbstbeschreibungsfähigkeit wurde durch die Gestaltung der Aufnahmetaste übernommen, die besonders vorhanden ist, wenn eine Aufnahme erwartet wird. Die Eignung für die Aufgabe wird umgesetzt, indem alle Schaltflächen konsistent inaktiv gestaltet werden, wenn die Funktion zurzeit nicht verfügbar ist. Im Aufnahmemodus ist das Standard User Interface stark abgeblendet. Das Gesetz der Nähe wird durch das Gruppieren von Schaltflächen in der Symbolleiste aufgegriffen, um anzuzeigen, dass sie zu verschiedenen Themen gehören. Das Ähnlichkeitsgesetz wird von Symbolen für Greifer öffnen und Greifer schließen aufgegriffen, die im Aufzeichnungsmodus ähnlich aussehen. So werden sie vom Thema her als zusammengehörig erkannt, sie unterscheiden sich jedoch farblich, damit man sie auseinanderhalten kann. Das interaktive virtuelle Mockup ist in Abbildung 55 rechts dargestellt.

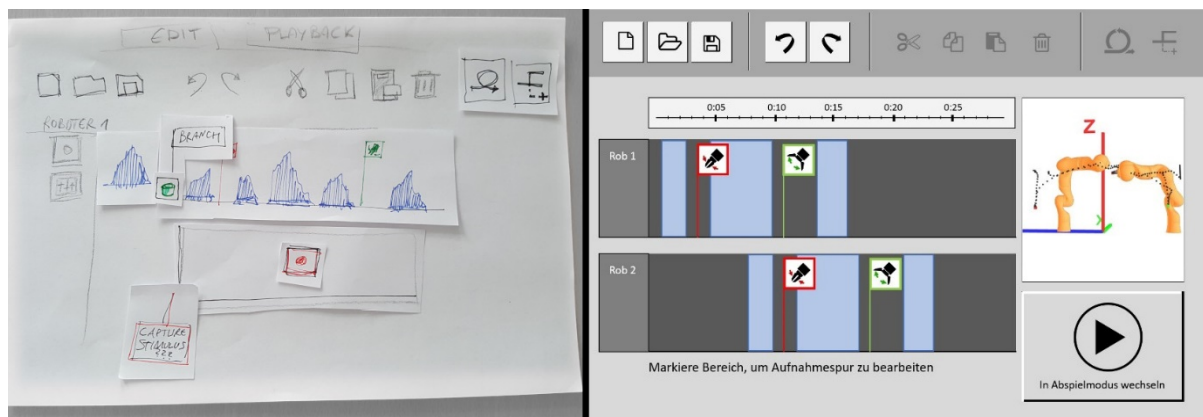


Abbildung 55: Links: Papierprototyp aus der ersten Designprozess-Iteration. Rechts: Interaktives, virtuelles Mockup des User Interfaces für die Multi-Roboter-Programmierung aus der zweiten Iteration (Colceriu et al. 2020).

Zusätzlich zur Neugestaltung der graphischen Benutzeroberfläche wurde auch eine Überarbeitung der Darstellung von Roboterprogrammen entlang von Zeitleisten entworfen. Dafür wurde eine kontextfreie Grammatik zur Beschreibung der Roboterprogramme und zu jedem Element der kontextfreien Grammatik eine graphische Darstellung in der Zeitleiste entwickelt (Riedl et al. 2020). Das Ergebnis dieser Formalisierung ist, dass sowohl eine textuelle Programmiersprache in Form der kontextfreien Grammatik existiert, als auch eine dazu duale graphische Darstellung der Roboterprogramme entlang der Zeitleiste. Dies hat den Vorteil, dass Programmierexperten in der Lage sind, den Quellcode direkt zu editieren, wohingegen auch Nicht-Experten ein Editieren der graphischen Roboterprogramme ermöglicht wird (Arbeitspaket 4.3.1). Durch eine schichtweise Darstellung mit zusammenklappbaren Programmteilen entlang von Zeitleisten wird sichergestellt, dass selbst bei komplexen Roboterprogrammen die Darstellung in der Zeitleiste übersichtlich bleibt. In Abbildung 56 ist links ein Auszug aus der entwickelten kontextfreien Grammatik und rechts ein Beispielprogramm für zwei Roboter mit der neuen graphischen Darstellung entlang von Zeitleisten zu sehen. Das Beispielprogramm beinhaltet zunächst ein Aufgreifen eines Objektes durch Roboter 1, dieses wird bei Sekunde 30 an Roboter 2 übergeben, welcher je nach Größe des Objektes bei Sekunde 40 unterschiedliche Aufgaben damit ausführt.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Benutzeroberfläche im Laufe des letzten Projektjahres auf berührungsempfindliche Oberflächen und Bedienbarkeit hin optimiert wurde. Eine Evaluation

mit potentiellen Nutzern des Systems, Werkern der Firma Krones, hat gezeigt, dass die Benutzung des Programmiersystems schnell und intuitiv möglich war und somit das Ziel dieses Arbeitspaketes erreicht wurde. Die detaillierten Ergebnisse der Evaluation können in Teilprojekt 5 nachgelesen werden. Zusätzlich wurde die Darstellung von Roboterprogrammen entlang von Zeitleisten mit Hilfe einer kontextfreien Grammatik formalisiert und dadurch die Möglichkeit geschaffen, äquivalente textuelle und graphische Darstellungen des gleichen Roboterprogramms zu erhalten.

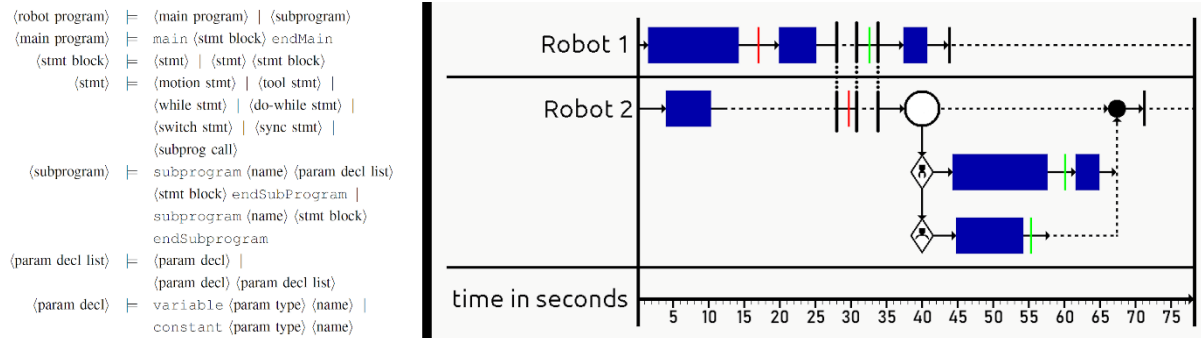


Abbildung 56: Links ein Auszug aus der kontextfreien Grammatik und rechts ein Beispiel der neuen Entworfenen Darstellung von Roboterprogrammen entlang von Zeitleisten (Riedl et al. 2020).

Arbeitspaket 4.2.3: Realisierung einer der untersuchten Darstellungsweisen zur Wiedergabe von Informationen der mobilen Plattform

Die Projektion wurde ab dem ersten Projektjahr als Ausgabemedium von der mobilen Plattform betrachtet, weil sie für alle Interagierenden mit dem Robotersystem, auch solche, die nur vorbeilaufen, einen Mehrwert darstellen kann. Die Implementierung der Projektion wurde im ersten Projektjahr zunächst am Roboter Scout umgesetzt und im zweiten Projektjahr auf die Grenzebach Plattform übertragen und untersucht. Bei der Projektion wird die Fahrriichtung, der Ladezustand und ein aktuelles Ereignis, z.B. Stopp, angezeigt. Im dritten Projektjahr wurde die Projektion als unterstützendes System zusätzlich zur Spracheingabe und Feststellung der Interaktionsbereitschaft eingesetzt.

1) Fortschritt der Augenerkennung durch eine Eye-Tracking Kamera:

Im zweiten Projektjahr wurde festgestellt, dass es zielführend ist, den Roboter nur dann in eine Interaktionsbereitschaft zu setzen, wenn der Mensch interagieren will. Dies kann über die Detektion des Menschen und dessen Bewegung erfolgen oder über einen längeren Blickkontakt zum Roboter, der über ein Eye-Tracking-System erreicht werden kann.

Um dem Menschen anzuzeigen, in welchem Status der Blickkontakt ist, werden Statusringe mit Hilfe des Projektors angezeigt (vgl. Abbildung 57). Wenn ein Mensch den Roboter für zwei Sekunden angeschaut, wird das Symbol grün, wodurch Kommunikationsbereitschaft signalisiert wird. Daraufhin wird das Sprachsteuerungs- und Geste-Erkennungsmodul aktiviert.



Abbildung 57: Fortschritt der Augenerkennung

2) Status der Sprachsteuerung

Im Rahmen der Sprachsteuerung wird der Projektor dazu verwendet, den Status des Mikrofons (Bereitschaft des Roboters zur Aufnahme eines Sprachbefehls) und die verstandene Information zu projizieren. Da dieses Konzept eine Verbindung zwischen Ein- und Ausgabesystem und damit einen Dialog darstellt, wird es in Arbeitspaket 4.3.3 beschrieben.

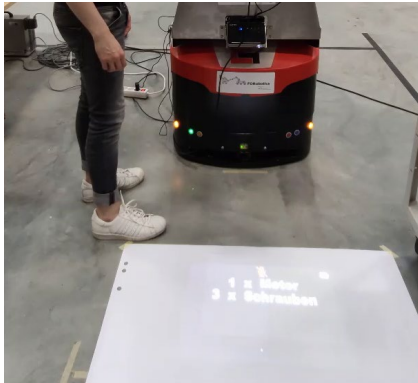


Abbildung 58: Ausgabe der Aufträge, die per Sprachsteuerung eingegeben wurden, mit Hilfe des Projektors

Zur Ausgabe von Sprachbefehlen wird ein Lautsprecher eingesetzt. Über den Sprachassistenten, wie er in Arbeitspaket 4.1.1 beschrieben ist, wird die synthetisierte Antwort generiert und über einen Lautsprecher ausgegeben. Da auch dies mit einer Eingabe verbunden ist, werden Details in Arbeitspaket 4.3.3 beschrieben.

Wie in Arbeitspaket 4.2.1 beschrieben, wurde im dritten Projektjahr die Tablet-Applikation zur weiteren Ausgabe bzw. auch Eingabe von Informationen weiter implementiert.

Arbeitspaket 4.3: Erweiterung zum Dialog zwischen den Ressourcen

Die in den beiden vorangegangenen Arbeitspaketen entwickelten Technologien dienen dem unidirektionalen Informationsfluss zwischen Mensch und System. Die zur Verfügung gestellten Informationen können hierbei auch vergleichbar einem Multicast an mehrere Empfänger zeitgleich vermittelt werden. Für die Steigerung der Interaktionsfähigkeit und -qualität werden jedoch oftmals eine zwingende sowie eine möglichst zeitnahe Reaktion auf eine vorangegangene Anfrage oder Eingabe eines bestimmten Interaktionspartners erwartet. Diese Merkmale sind für einen Dialog zwischen zwei interagierenden Ressourcen charakteristisch. Daher fokussieren die Inhalte dieses Arbeitspakets den echtzeitnahen Austausch zwischen verschiedenen Ressourcen der Produktionsumgebung, also zwischen System-System wie auch Mensch-System. Bei der Nutzung eines Touch-Bildschirms wird der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgabesystem schnell erkennbar und ist schwierig voneinander zu trennen. Daher wurden die einzelnen Aspekte aus den Arbeitspaketen 4.1 und 4.2 zu einem Dialog erweitert.

Arbeitspaket 4.3.1 Intuitives Editieren von Multi-Roboterprogrammen

Die Arbeitspakete 4.1.2 und 4.2.2 haben das Aufzeichnen und Darstellen von Roboterprogrammen für Mehrrobotersysteme behandelt. Die als intuitive Programmiermethode zur Programmierung von Robotern hergenommene Playback Programmierung ist in der reinen Form jedoch stark limitiert. Macht der Benutzer während der Aufzeichnung einen Fehler, so muss in der Regel das gesamte Programm ein weiteres Mal aufgezeichnet werden. Dieses Problem wurde im ersten Projektjahr mit Umsetzung der graphischen Editierfunktionen in Form von Kopieren, Ausschneiden, Einfügen und Löschen in der Zeitleiste eliminiert. Dabei können jedoch Sprungstellen in der Trajektorie entstehen. Diese wurden anfangs mit Punkt-zu-Punkt Bewegungen verbunden, was dazu führen kann, dass es zu Kollisionen kommt. Auch kommt es bei den Editierfunktionen zu Problemen, wenn mehrere Roboter gemeinsam eine Aufgabe ausführen sollen und die Trajektorie eines Roboters editiert wurde. Hierbei passen anschließend die Bewegungen nicht mehr zueinander und die Ausführung der Aufgabe erfolgt unter Umständen auf den einzelnen Robotern zeitversetzt.

Im zweiten Projektjahr wurden diese beiden Probleme behandelt, um die Flexibilität der Playback Programmierung zu erhöhen.

Für das Problem der Sprungstellen wurde ein Konzept entwickelt und implementiert, welches es dem Benutzer erlaubt, mit Hilfe von multimodalem Feedback zwischen der Start- und der Zielkonfiguration den Roboter manuell zu führen. Unterstützt wird der Benutzer mit Feedback des Programmiersystems in Form von haptischer Rückmeldung und visueller Rückmeldung. Die haptische Rückmeldung sorgt dafür, dass der Roboterarm einrastet, sobald er sich in einem gewissen Zielbereich um die Zielkonfiguration befindet, so dass der Benutzer durch ansteigende Steifigkeiten merkt, dass die Zielkonfiguration erreicht wurde. Das visuelle Feedback hingegen zeigt dem Benutzer während des Führens im dreidimensionalen Vorschaufenster einen Pfeil von der aktuellen Konfiguration des Roboters zur Zielkonfiguration an. Dieser wird je nach Abstand zur Zielkonfiguration in einem Ampel-Farbschema eingefärbt, so dass der Benutzer erkennen kann, welchen Teil der Strecke er schon zurückgelegt hat. Zusätzlich wird ein „Geisterroboter“ in der Zielkonfiguration eingeblendet. Das Programmiersystem während des Führens zur Zielposition und das Ampel-Farbschema ist in Abbildung 59 dargestellt. Der rote Roboter zeigt einen Erfüllungsgrad von ca. 5 % an, der gelbe von ca. 50 % und der grüne von ca. 95 %. Dieses Konzept wurde in (Riedl et al. 2018) beschrieben und evaluiert.

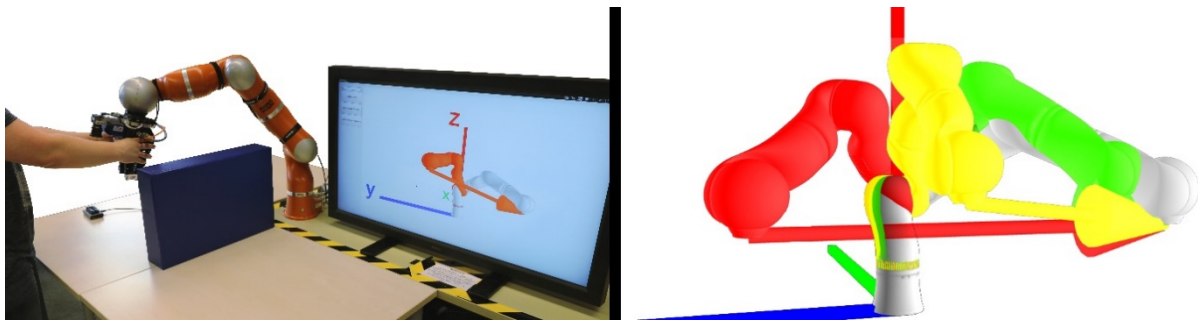


Abbildung 59: Links: Führen des Roboters zur Zielposition. Der orange Pfeil zeigt, dass ca. 80% des Weges zwischen Start- und Zielkonfiguration noch zurückgelegt werden müssen. Der weiße Roboter zeigt die Zielposition, die erreicht werden soll. Unten: Die Ampel-Farbgebung von Robotern mit ca. 5 % (rot), ca. 50 % (gelb) und ca. 95 % (grün) Erfüllungsgrad (Riedl et al. 2018).

Das Problem der zueinander verschobenen Bewegungen nach dem Editieren einer Trajektorie bei Mehrrobotersystemen wurde dadurch gelöst, dass Synchronisationspunkte und -intervalle eingefügt werden. Die Punkte sorgen dafür, dass alle Roboter an den definierten Zeitpunkten aufeinander warten und erst danach die Bewegung fortsetzen. Die Intervalle hingegen sorgen dafür, dass alles innerhalb des definierten Intervalls synchron ausgeführt wird. So wird sichergestellt, dass Bewegungen, die gleichzeitig ausgeführt werden sollen, auch nach dem Editieren einzelner Bewegungen noch gleichzeitig ausgeführt werden. Dabei funktionieren sowohl die Synchronisationspunkte als auch die Synchronisationsintervalle wie Barrieren (Solihin et al. 2015). Die visuelle Darstellung von Synchronisationsintervallen in der Zeitleiste der Benutzeroberfläche ist in Abbildung 60 dargestellt.

Mit der Umsetzung des zielgerichteten Führens und der Synchronisation mehrerer Roboterprogramme wurde dieses Arbeitspaket im zweiten Projektjahr abgeschlossen, so dass keine weiteren Tätigkeiten im dritten Projektjahr notwendig waren.

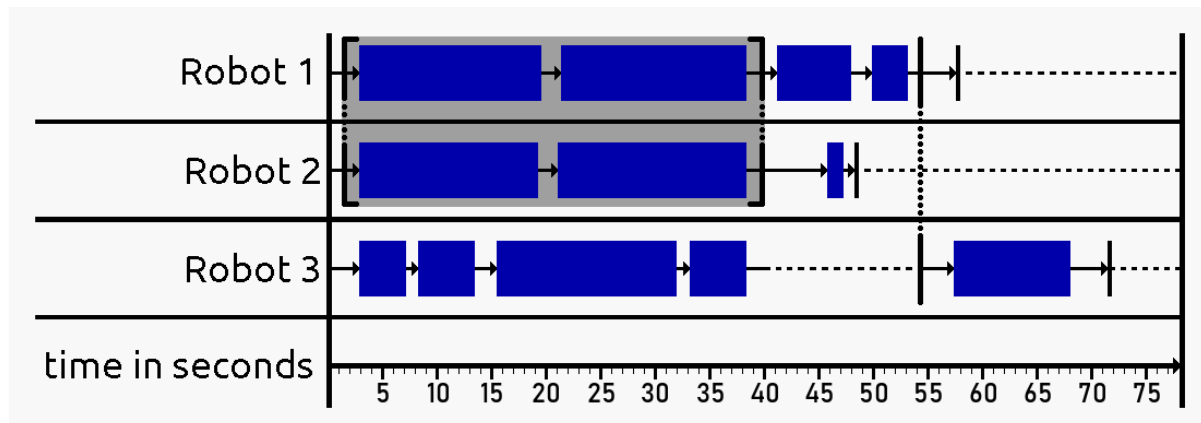


Abbildung 60: Darstellung von Synchronisationsintervallen (Roboter 1 und 2, Sekunde 2 bis 40) und von Synchronisationspunkten (Roboter 1 und 3, Sekunde 54) in der Zeitachse der Benutzeroberfläche.

Arbeitspaket 4.3.2: Steigerung des Interaktionsvermögens bei der kooperativen Aufgabenerfüllung und manuellen Fernsteuerung durch direktes Feedback

Nach dem projektierten Zeitplan der ursprünglichen Beantragung war die Bearbeitung des vorliegenden AP 4.3.2 ab der Hälfte des zweiten Projektjahres vorgesehen. Der Bearbeitungsbeginn wurde jedoch bereits in das erste Projektjahr (also 2017) vorgezogen, da erforderliche Vorarbeiten schon vor dem Projektstart von FORobotics erschlossen werden konnten. Wesentliche Teile des vorliegenden APs konnten somit bereits 2017 abgeschlossen werden. Diese sind in den vorangegangenen Zwischenberichten detailliert dokumentiert. Aufgrund der Relevanz der AV-Teleoperation für Havarie-Szenarien innerhalb des Use Case durch Fernaufschalten eines Operators auf eine mobile Plattform im Fehlerfall, wurde die Bearbeitung der Forschungsinhalte bis in das letzte Projektjahr verlängert.

Das vorliegende AP basiert maßgeblich auf den Entwicklungen des Arbeitspaketes AP 4.1.3. Einleitende Informationen zum Teleoperationssystem sind in dort beschrieben.

Dieses AP fokussierte die Steigerung des Interaktionsvermögens der Teleoperation und der kooperativen Aufgabenerfüllung zwischen Menschen und Roboter. Hierzu gehören unter anderem die folgenden Forschungsaspekte:

- Immersives Einbinden des Operators in den Teleoperationsvorgang,
- Interpretation der durchgeführten Aufgabe und Entlastung des Operators sowie
- das Rückkoppeln von Feedback an den Operator.
- Die untersuchten Forschungsfragen des ersten Projektjahres führten zusammenfassend zu den folgenden Ergebnissen bzw. erschlossenen Aspekten der Teleoperation:
- Entwicklung und Erprobung einer Augmented Reality-Teleoperation basierend auf der VR-Hardware HTC VIVE sowie der 3D-Spieleengine Unity3D,
- echtzeitnahe Erfassung und Abbildung der prozessrelevanten Realität innerhalb der virtuell gerenderten Umgebung basierend auf 3D-Sensorik und Roboterzustandsinformationen sowie

- die Entwicklung und Evaluation einer möglichst intuitiven Bedienung und einer den Teleoperationsvorgang vereinfachenden grafischen Benutzeroberfläche.

Die hierbei erzielten Ergebnisse stellen eine vielversprechende Alternative gegenüber etablierten Technologien zur Einbindung des Operators in den Teleoperationsvorgang dar. Klassischerweise erfolgt die Teleoperation basierend auf Joystick oder Masterarmkinematik sowie Monitoren als visuelles Prozessfeedback. Durch die VR-Technologien ist es hingegen möglich sich quasi frei in den robotergestützten Prozess hineinzubegeben (eine entsprechende sensorische Erfassung und Repräsentation innerhalb der VR vorausgesetzt). Die 6D-Handcontroller der HTC VIVE erlauben eine intuitive sowie genügend präzise Positionierung des Endeffektors im Raum. Darüber hinaus können diese ein vibrotaktilen Feedback den Operator zurückgeben. Letzteres kann exemplarisch auf Basis detektierter Kräfte am Roboter-Toolcenter ausgelöst werden.

Die folgende Abbildung 61 veranschaulicht diesen erzielten Entwicklungssprung.



Abbildung 61: Vergleich konventionelle Teleoperation gegenüber der entwickelten AV-Teleoperation (Bildquellen von links nach rechts: nnl.co.uk, becbusinesscluster.co.uk sowie Alex Muchnik/EVENTFOTOGRAF.in, Essen)

Da die Inhalte des APs zum Beginn des zweiten Projektjahres bereits vorangeschritten waren, lag der Fokus der Untersuchungen und Optimierungen – insbesondere im Hinblick auf die im Projektjahr 2018 erfolgte Ergebnisausstellung auf der internationalen Fachmesse Automatica 2018 (06/2018) – auf Untersuchungen zur Steigerung der Intuitivität sowie zur Operatorentlastung bzw. -unterstützung.

Die nachfolgende Abbildung 62 veranschaulicht eine Auswahl an im Rahmen des zweiten Projektjahres entwickelten sowie während der Automatica 2018 Fachmesse erprobten Operator-Unterstützungsaspekte sowie Hilfen zur Steigerung der Intuition.

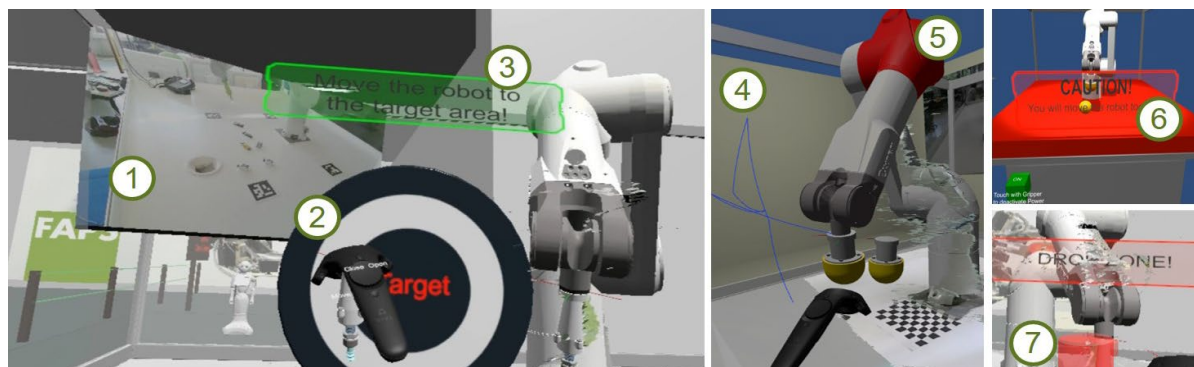


Abbildung 62: Aspekte zur Operatorentlastung basierend auf Visualisierung im Rahmen der Automatica 2018

Untersuchungen adressierten die Integration eines Live-Streams der Farbkamera (1) innerhalb der virtuellen Welt zusätzlich zum 3D-Rendering in Form eines virtuellen Bildschirms, die Integration eines kurzen Tutorials (2) für das schnelle Anlernen des Operators, die Möglichkeit einer Art temporären Beschriftung (3), das Aufzeichnen erfolgter Trajektorien (4), die Visualisierung von erreichten Achsgrenzen des Manipulators (5), die Warnung bei Erreichen gesperrter Schutzräume (6) sowie das Visualisieren von anzufahrenden Ziel-Räumen am Beispiel der Markierung einer Greifobjektabwurfzone (7). Darüber hinaus wurde das automatisierte Greifpose-Ausrichten des Endeffektors für das erleichterte Greifen untersucht sowie Maßnahmen zur Kollisionsvermeidung mit veränderlichen Objekten im Operationsraum untersucht und umgesetzt.

Im dritten Projektjahr erfolgten Untersuchungen hinsichtlich einer weiteren Steigerung der Immersion bei Teleoperationsvorgängen. Die Forschungsinhalte fokussierten hier insbesondere die weitere Verbesserung der Umgebungsrepräsentation durch Objekterkennung, -Poseschätzung und Modellrendering anstelle von unvollständig die Umgebung repräsentierender Punktwolken. Ebenso sollte die Möglichkeit zur Wissensintegration rudimentär untersucht werden. Die nachfolgende Abbildung 63 und Abbildung 64 veranschaulichen die Forschungsfrage sowie zeigen diese den im Rahmen des letzten Projektjahres untersuchten und erschlossenen Lösungsansatz. Dieser ist Bestandteil einer eingereichten und akzeptierten Veröffentlichung (Blank et al. 2021).

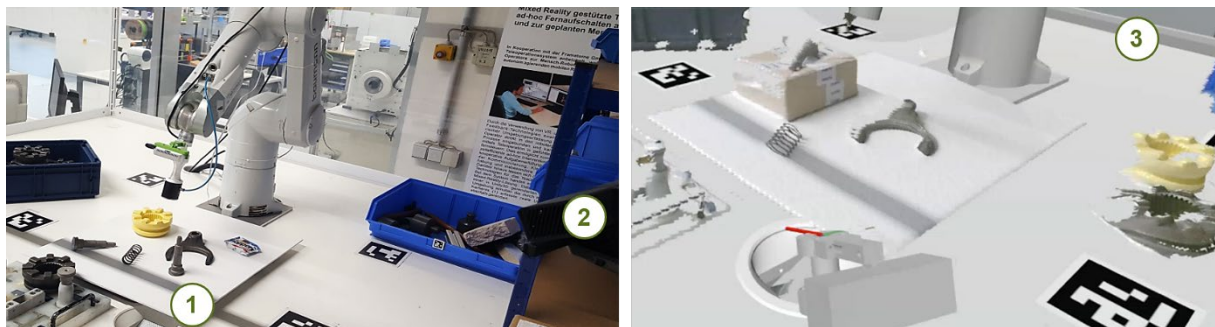


Abbildung 63: Teleoperationstestumgebung (links) sowie rein Punktwolken-basiertes Rendering (rechts) – Abschattung, Sensorrauschen und Messprinzip führen zu unvollständiger Umgebungsrepräsentation innerhalb der AV.

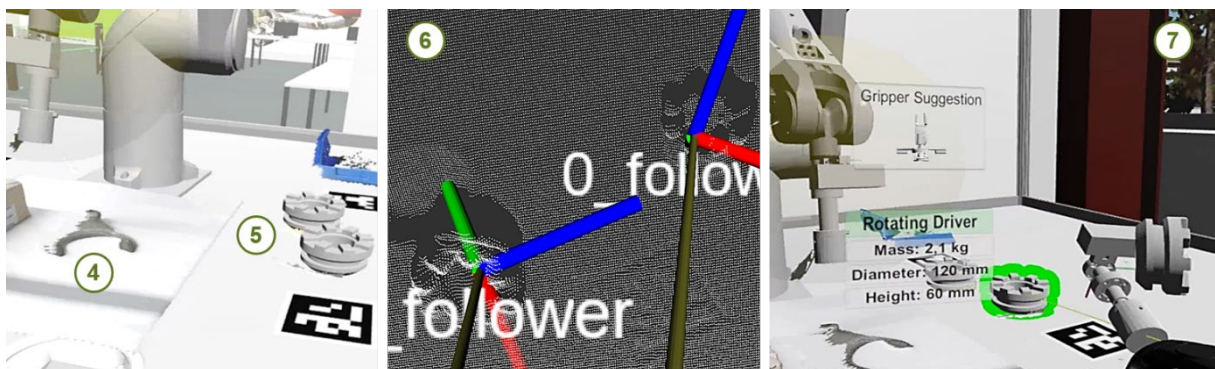


Abbildung 64: Augmented Reality (AV) mit integrierter Objekterkennung und Poseschätzungspipeline (links); Pose-schätzungsergebnis der Pipeline (mittig); Beispielhaft in die AV integriertes Expertensystem (rechts).

Abbildung 63 (links) zeigt den Forschungsdemonstrator zur Teleoperation mit den im Use Case untersuchten Versuchskomponenten (1). Hierbei handelt es sich um die texturlosen, metallischen Komponenten: Schaltstange, Schaltgabel sowie Schaltmuffe. Im Beispiel werden diese mit nur einer einzigen 3D-Kamera des Typs KinectV2 (2) (Time-of-Flight) erfasst. Abbildung 63 (rechts) bildet dabei den Technologiestand der AV des zweiten Projektjahres ab. Da eine einzelne Kameraperspektive stets aufgrund von Abschattungen oder Rauschen unvollständig ist (3), eine AV jedoch das freie Bewegen des Operators im Raum ermöglicht, führt dies zu einer unvollständigen Umgebungsrepräsentation.

Seit dem Projektjahr 2019 wird daher untersucht, inwieweit eine weitere Steigerung der Immersion bzw. der Umgebungsrepräsentation der Augmented Virtuality, eine weitere Reduktion der erforderlichen Datenübertragungsbandbreite für mobile Systeme sowie eine Operatorentlastung erzielt werden können. Im Fokus standen dabei die von TP 2 im Rahmen des Bin-picking-Anwendungsfall entwickelten Methoden zur Objekterkennung, -Lokalisierung und 6DoF-Poseschätzung (Blank et al. 2019). Liegen ausreichend gute Erkennungs- und Poseschätzungsergebnisse für die einzelnen Objekte im Arbeitsraum vor, so können anstelle von Bandbreiten-intensiver 3D-Punktwolken folgend Objektidentifikationsnummern sowie Poseinformationen an das Umgebungsmodellierungs- oder das Teleoperationssystem übermittelt werden, wodurch sich die erforderliche Bandbreite reduziert. Statt rauschbehafteter, unvollständiger Punktwolken werden folgend CAD-Modelle der erkannten Objekte in der geschätzten 6DoF-Pose gerendert (5). Dies vervollständigt die gerenderte AV, wodurch sich die Immersion verbessert. Noch nicht erkannte oder untrainierte Objekte (4) werden dabei weiterhin als 3D-Punktwolke mit fusioniertem Farbbild dargestellt.

Werden für die an die Pipeline antrainierten Objekte zusätzliche technischen Daten sowie Prozesswissen im AV-System hinterlegt, so können dem Operator bei Bedarf (z. B. durch bewusstes Auswählen bzw. Zielobjektmarkieren) diese Informationen während des Teleoperationsvorgangs in Anlehnung an ein Expertensystem zur Operatorentlastung bei durchzuführenden Aufgaben eingeblendet werden (vgl. Abbildung 64– (7)). Erfolgreich untersucht und getestet wurden im Testszenario das Bereitstellen der technischen Daten des Objekts (z. B. Gewicht, Durchmesser, Höhe) sowie eine Empfehlung des geeignetsten Greifers.

Arbeitspaket 4.3.3: Verbindung des Hin- und Rück-Kanals zu einem Dialogkonzept

Einige der Ein- und Ausgabemodalitäten sind schwer voneinander zu trennen, da zu einer Ausgabe eine Eingabe notwendig wird oder umgekehrt. Auch wenn zunächst nicht als explizites Arbeitspaket vorgesehen, wurden die Systeme zur Ein- bzw. Ausgabe zu einem Dialogkonzept zusammengeführt. Insbesondere bei der Sprachausgabe ist eine visuelle Unterstützung vorteilhaft, sodass der Mensch auch sehen kann, was das System verstanden hat, um so die Akzeptanz des Menschen zu erhöhen.



Abbildung 65: Beamerausgabe bei der Sprachsteuerung

Daher wird zusätzlich zur Audioausgabe der Projektor als Ausgabe für den Status der Sprachsteuerung eingesetzt, wie bereits in Arbeitspaket 4.2.1 beschrieben. Wie in Abbildung 65 dargestellt, zeigt der Projektor ein rotes Mikrofon, die Batterieanzeige sowie den Text, den das Sprachsystem verstanden hat. Wird

der Roboter über das Eye-Tracking-System in Interaktionsbereitschaft gesetzt, so wird die

Sprachsteuerung aktiviert und das Mikrophon Grün eingefärbt. Auf der Oberfläche können mehrere Texte untereinander angezeigt werden, falls der Mensch mehrere Eingaben macht. Nach Eingabe einer Aufgabe, fragt das System, ob noch weitere Aufträge eingegeben werden sollen.

Um den echtzeitnahen Austausch zwischen verschiedenen Ressourcen der Produktionsumgebung zu ermöglichen, wird eine passende Software-Architektur benötigt, die Roboterplattform wird deshalb mit einem MQTT basiertes System ausgestattet, siehe Abbildung 66. Die Einzelsysteme können dadurch Statusinformationen und Daten miteinander austauschen.

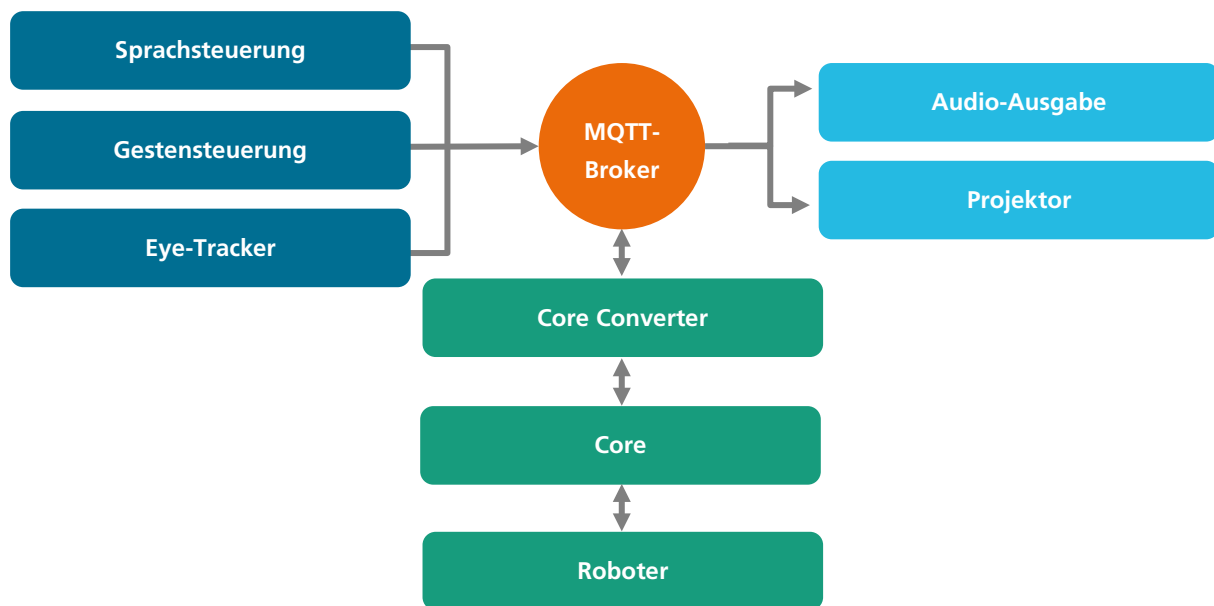


Abbildung 66: Gesamtarchitektur des Dialogsystems

Das Modul Eye-Tracker ist verantwortlich für die Erkennung der Kommunikationsbereitschaft. Schaut der Mensch für eine gewisse Zeit in Richtung des Roboters, so öffnet das Robotersystem die Bereitschaft zur Befehlseingabe. Beendet der Mensch den Blickkontakt, beendet auch der Roboter seine Kommunikationsbereitschaft. Damit ein versehentlicher Augenkontakt oder eine kurze Betrachtung des Roboters ohne Intention zur Interaktion, nicht zur Kommunikationsbereitschaft des Roboters führt, muss der Blickkontakt über zwei Sekunden aufrechterhalten werden. Erst bei kontinuierlicher Augenerkennung über zwei Sekunden reagiert der Roboter auf den Menschen. Das System ermöglicht einen Austausch von einigen Parametern in der Gestensteuerung durch Sprachsteuerung. Auch hier wird eine Geste nur dann verarbeitet, wenn die Erkennungskomponente durch ein Eye-Tracking-System bei Fokussierung des Menschen auf den Roboter entsperrt wurden.

In Abbildung 76 wird nun ein Use Case in der Regallagerkommissionierung dargestellt. Der Roboter hat einen Auftrag erledigt und navigiert zur nächsten Arbeitsstation. Eine Werkskraft hat parallel auch den Auftrag, ein Objekt aus dem Lager holen. Steht die Werkkraft nun dem Roboter gegenüber, so kann er seinen Auftrag an den Roboter geben. Die Werkkraft entriegelt also den Roboter durch direktes Anschauen und zeigt die „Stopp-Geste“. Die Interaktionsbereitschaft wird im Robotersystem bestätigt und die „Stopp-Geste“ ausgewertet. Der Roboter projiziert „Stopp“

auf den Boden, und die Werkskraft kann nun durch Nutzung des Tablets oder durch Sprachsteuerung Befehle eingeben, wie etwa „Bring mir zwei Motoren“. Wird der Befehl durch das Tablet eingegeben, erfolgt die Beendigung der Eingabe durch einen Button. Bei Eingabe durch Sprachsteuerung erfolgt die Kommunikation durch einen Dialog zwischen Roboter und Mensch. Der Roboter fragt: „Soll ich noch was aus dem Lagern holen?“ und mit einer Antwort wie „Nein, das war alles“ von der Werkkraft, ist der Eingabeprozess beendet. Gleichzeitig wird der eingegebene Befehl durch Projektion angezeigt. Ist die Eingabe beendet, werden der aktuelle Auftrag, sowie die Fahrtrichtung durch Projektion angezeigt.

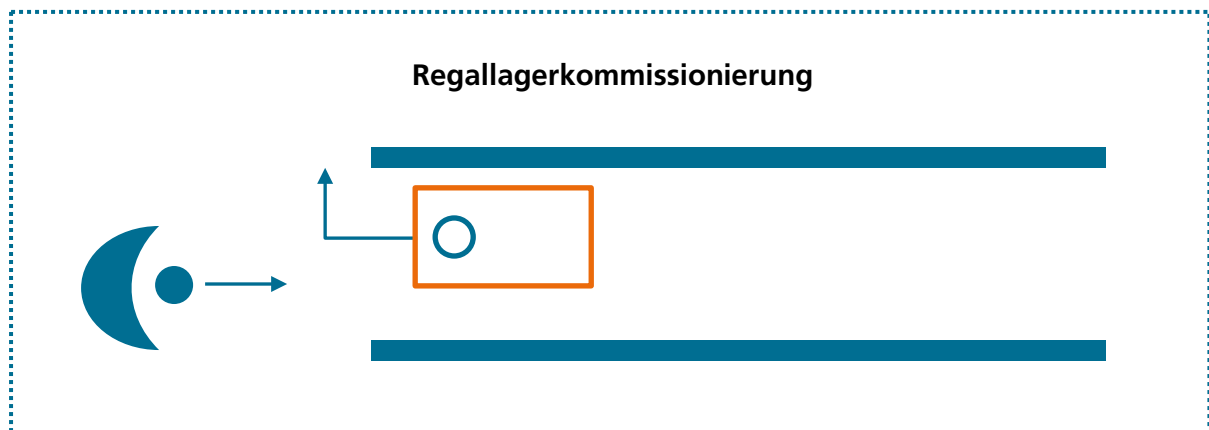


Abbildung 67: Interaktionsbespiel bei Regallagerkommissionierung

Arbeitspaket 4.4: Befähigung der Systeme zur Kognition

Menschen können aufgrund ihrer kognitiven Fähigkeiten Umgebungen und Zusammenhänge erfassen und diese verstehen. Dadurch können mehrere Partner in einem Team eine Aufgabe gemeinsam ausführen, ohne Partner oder Aufgabe zuvor gekannt zu haben. In der Industrie bisher eingesetzte Roboter verfügen kaum über solch kognitive Fähigkeiten. Um jedoch eine harmonische und vom Menschen akzeptierte Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter zu ermöglichen, bedarf es Fähigkeiten des Roboters, den Menschen zu erfassen und seine Situation zu erkennen, um darauf entsprechend reagieren zu können. Dies wird im vorliegenden Arbeitspaket betrachtet. Ziel ist es, dass der Roboter den aktuellen Status des Menschen erkennt, bspw. welche Tätigkeit gerade durchgeführt wird, und basierend darauf seine nächste Aktion aufbaut.

Arbeitspaket 4.4.1: Wissensbasierte Ergänzung von Multi-Roboterprogrammen

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, nachdem in den Arbeitspaketen 4.3.1, 4.2.2 und 4.1.2 die grundlegenden Funktionen zur Eingabe, Visualisierung und Modifizierung von Roboterprogrammen umgesetzt wurden, die Mächtigkeit des entstandenen Programmiersystems zu erweitern, indem dieses auch auf äußere Eindrücke mittels Sensoreingaben reagieren kann. Dies ermöglicht dem System während des Ausführens von Roboterprogrammen auf Änderungen der Umwelt mit Hilfe einer zentralen Wissensdatenbank zu reagieren. Notwendig ist dies, damit bestimmte, oft verwendete Teilprogramme nicht in jedem Roboterprogramm neu eingegeben werden müssen, sondern auf vorher gewonnene Sensoreindrücke und ausgeführte Teilprogramme aus einer Wissensdatenbank zurückgegriffen werden kann und diese ausgeführt werden können.

Dabei lag der Fokus weniger auf eine kollisionsfreie Bahnplanung mit Hilfe eines Umweltmodells, sondern mehr auf eine dynamische Reaktion auf Sensordaten mit Hilfe einer Wissensdatenbank, da es mit der mobilen Plattform und den limitierten Sensoren kaum möglich ist, ein vollständiges und exaktes Umweltmodell zur Planung von Feinbewegungen des Roboters zu erstellen. Mögliche Sensoren sind eine Eye-in-Hand-Kamera direkt am Greifer oder der Greifer selbst, der an sich kein Sensor ist, aber dessen Öffnungswinkel als Sensorwert interpretiert werden kann.

Hierfür wurde im zweiten Projektjahr ein Konzept für sensorbasierte Wiederholungen und Alternativen als Erweiterung zur Playback Programmierung ausgearbeitet und implementiert. Wiederholungen können verwendet werden, damit sich wiederholende Aufgaben nur einmal demonstriert werden müssen und anhand eines Sensoreindrucks erkannt werden kann, wie häufig die Wiederholung ausgeführt werden soll. Alternativen sorgen dafür, dass auf unterschiedliche Umweltzustände mit unterschiedlichen Teilprogrammen reagiert werden kann. Anhand des zur Ausführungszeit aufgenommenen Sensoreindrucks wird dabei festgestellt, welche Alternative ausgeführt werden soll.

Sowohl Wiederholungen als auch Alternativen funktionieren analog zu Schleifen bzw. Verzweigungen in prozeduralen Programmiersprachen. Während der Programmierung werden Referenzsensorwerte aufgezeichnet, welche als Bedingungen für die Wiederholung bzw. für einzelne Zweige verwendet werden. Beim Ausführen wird der aktuell erkannte Sensorwert mit den Referenzwerten verglichen und Anhand des Vergleichs entschieden, ob die Wiederholung noch einmal abgespielt werden soll bzw. welche Zweig der Alternative abgespielt werden soll. Abbildung 68 die Darstellung von Wiederholungen und Alternativen in der Benutzeroberfläche.

Das Konzept der sensorbasierten Wiederholungen und Alternativen wurde in (Riedl et al. 2017) genauer erläutert und in Zusammenhang mit dem gesamten Programmiersystem im Hinblick auf Intuitivität evaluiert.

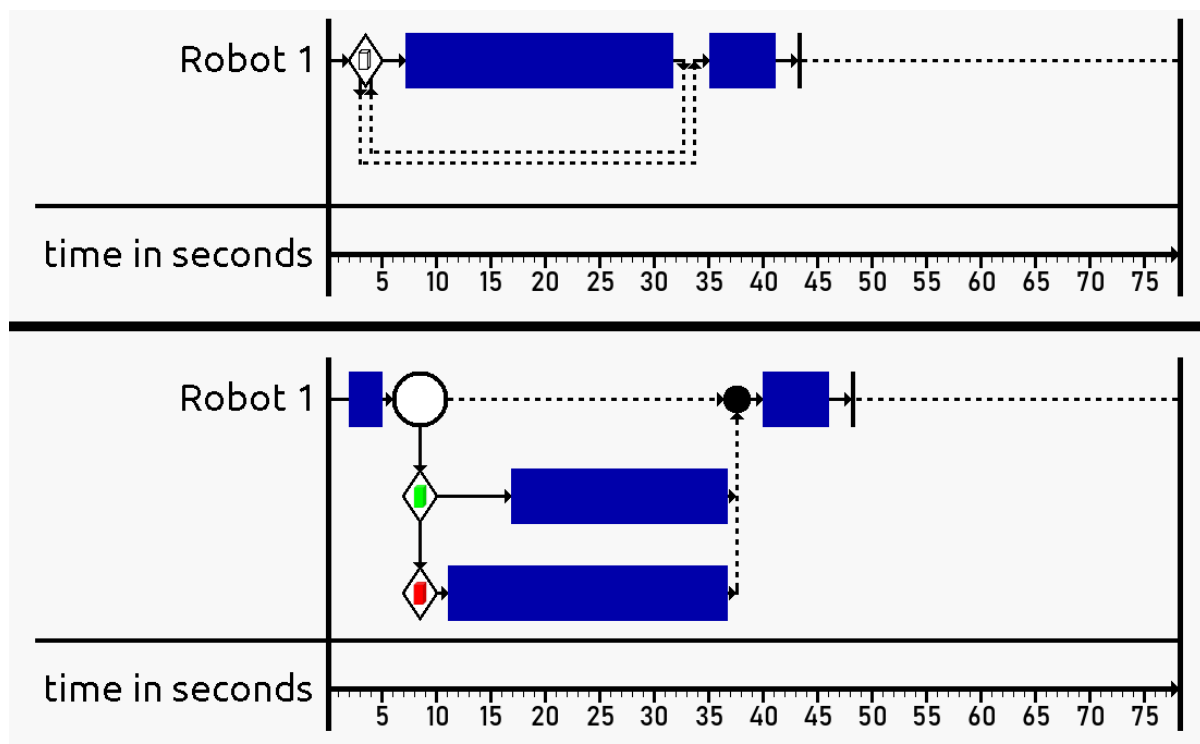


Abbildung 68: Darstellung von Wiederholungen (oben) und Alternativen (unten) in der Zeitleiste der Benutzeroberfläche.

Mit der Umsetzung der sensorbasierten Wiederholungen und Alternativen wurde dieses Arbeitspaket im zweiten Projektjahr abgeschlossen. Weitere wissenschaftliche Erweiterungen wurden aufgrund des Fokus auf die Verbesserung der graphischen Benutzeroberfläche und der Darstellung von Multi-Roboter Programmen (Arbeitspaket 4.2.2) im letzten Projektjahr nicht mehr betrachtet.

Arbeitspaket 4.4.2: Erfassung der Ausführungsweise des Menschen

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, die aktuelle Tätigkeit des Menschen zu detektieren und auszuwerten, um daraus die Intention des Menschen und damit die Interaktionsstrategie des Roboters ableiten zu können. Im zweiten Projektjahr wurden Wärmebildsensoren zur Detektion eines Menschen evaluiert. Es wurde festgestellt, dass der Wärmebildsensor eingesetzt werden kann, um die Anwesenheit einer Person anhand seiner Temperatur zu erfassen. Basierend auf der Detektion des Menschen, wird die Kinect ausgerichtet, sodass diese den Menschen fokussiert. Das Konzept wurde im zweiten Projektjahr prototypisch implementiert und im dritten Projektjahr erweitert, um die Ausführungsweise des Menschen zu erfassen, siehe Abbildung 69.

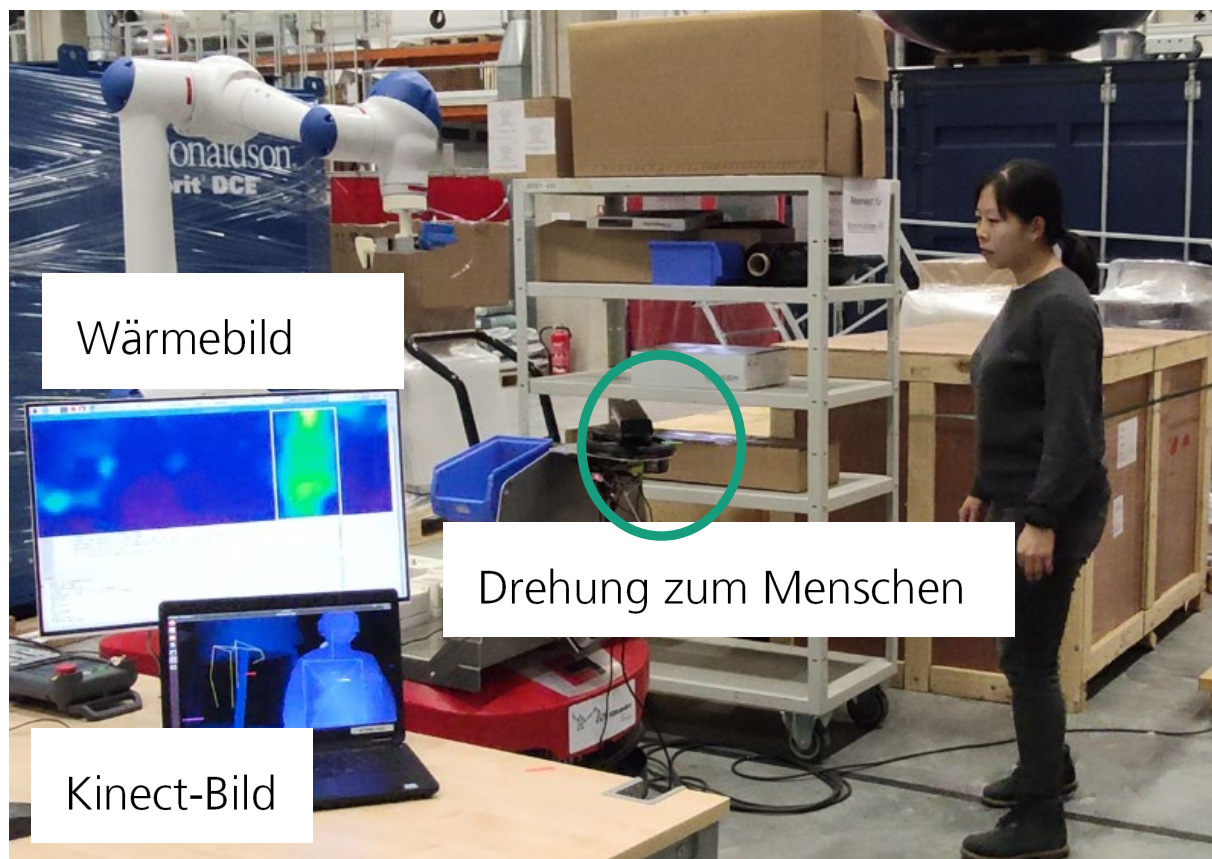


Abbildung 69: Erfassung von Personen mit Wärmebildsensor und Kinect

Um die Ausführungsweise des Menschen bei einer Regallagerkommissionierung wiederzuerkennen, muss ein System trainiert werden. Daher wurden im dritten Projektjahr die menschliche Be-

wegung bei einer Kommissionierungsaufgabe mittels Kinect aufgezeichnet. Dabei wurden die folgenden menschlichen Aktivitäten als diskrete Ereignisse betrachtet: in die Szene eintreten, Objekte suchen, Greifen eines Objekts und Verlassen der Szene. Die beweglichen Daten wurden von zwei Personen aufgenommen. Sie führen die Bewegung jeweils zehn Mal durch. Bei der Suche der Objekte wurden zwei Fälle betrachtet:

- 1) Die Person findet das Objekt erfolgreich und greift es.
- 2) Die Person sucht nach einem Objekt und findet es nicht.

Im zweiten Szenario soll sich der Roboter mit Tönen dem Menschen bemerkbar machen, um zu signalisieren, dass er zu der Station muss. Farbbilder, Tiefenbilder und Skelettdaten werden durch die Kinect v2 aufgenommen. Skelette sind die 3D-Position und Orientierung der Gelenke in einem Koordinatensystem.

Abbildung 70 zeigt die Tiefenbild und Skelettaufnahmen eines Menschen in der Regallagerszene. Wie darin zu erkennen, sind Knie und Füße nicht aufgezeichnet, so dass die zugehörigen Skelettdaten ungenau sind. Deshalb werden diese nicht weiter berücksichtigt. Die Aktivität wird durch die 3D-Pose (x,y,z) von Kopf, Hals, Rumpfmittle, linker/rechter Hand, linkem/rechten Ellenbogen, linker/rechter Schulter, linke/rechte Hüfte repräsentiert. Jede Aktivität wird als multivariable Zeitreihe dargestellt. Die Länge der Zeitreihen ist für jede sich wiederholende Aktion unterschiedlich. Wie im zweiten Zwischenbericht beschrieben, sind Hidden Markov Modelle (HMM) ein statistisches Werkzeug zur Modellierung von generativen Sequenzen, die ein beobachtetes Signal als das Ergebnis des Übergangs eines Systems zwischen mehreren Zuständen betrachten, wobei in jedem von ihnen eine bestimmte Wahrscheinlichkeit besteht, dass ein Symbol beobachtet werden könnte. Details werden in Arbeitspaket 4.4.3 beschrieben.

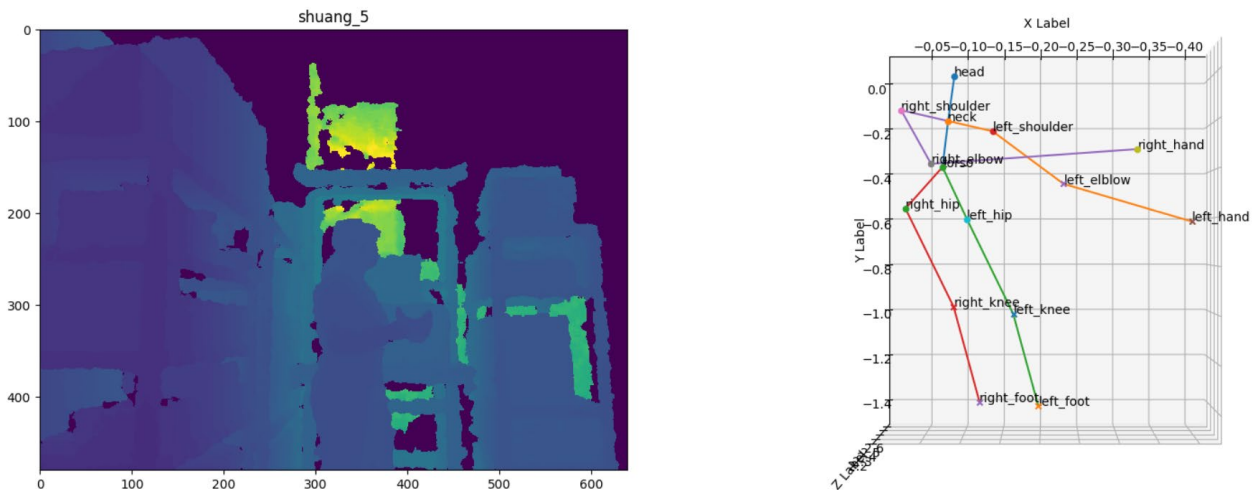


Abbildung 70: Tiefenbild und Skelettdaten eines Menschen in einer Regallagerszene

Menschliche Keypoints (Gesicht und Gelenke- Position im 2D Bild, Abbildung 71) werden aus den Farbbildern mittels OpenPose extrahiert. Die Evaluation zeigt, dass OpenPose besser als das Programm von Kinect funktioniert, wenn der Mensch seitlich zur Kamera steht. Der Nachteil der

Webcam ist, dass keine 3D Informationen ausgegeben werden können, welche für mobile Robotersysteme jedoch wichtig sind, da der Roboter sich im dreidimensionalen Raum bewegt. Nur mit 3D-Daten kann der Roboter feststellen, in welchem Abstand sich der Mensch befindet.

OpenPose (Cao et al. 2018) ist eine Software zur Schätzung der Körperhaltung von Multi-Personen in 2D in Echtzeit. Sie wurde von der Carnegie Mellon University (CMU) entwickelt. Um OpenPose zu verwenden, ist ein Hochleistungsrechner mit Grafikkarte und eine beliebige Kamera notwendig. OpenPose bildet Keypoints des menschlichen Körpers, der Hände und des Gesichtes ab. OpenPose wird verwendet, um die Daten der „Body25“ zu erhalten, die die Aktivität repräsentieren, wobei jedes Gelenk eine 2D-Position (x,y) hat. Jede Aktivität wurde 10 Mal für jede Person erfasst, hat 2 Koordinaten und wurde durch Frames mit unterschiedlicher Länge dargestellt. Die erfassten Daten werden ebenfalls für das Training des HMM-Modells verwendet. Der genaue Trainingsprozess wird in Arbeitspaket 4.4.3 beschrieben.



Abbildung 71: Auswertung der Körperpositionen mit „Body25“ von OpenPose

Mit Hilfe der oben beschriebenen Methoden wird der Mensch in einer Szene erfasst. Mit diesen Daten wird in Arbeitspaket 4.4.3 ermittelt, in welcher Situation sich der Mensch befindet, welche Aufgabe er gerade erledigt und ob er den Roboter bemerkt hat.

Um festzustellen, ob der Mensch den Roboter bemerkt, z. B. wenn dieser in ein Regallager einfährt, in dem sich der Mensch befindet, kann die Pose des Gesichts ausgewertet werden. Lemaignan et al. 2017 entwickelte eine Methode zur Echtzeitbewertung der Aufmerksamkeit in der Mensch-Roboter-Interaktion. Es wird zunächst die Pose des Kopfs ermittelt. Das Aufmerksamkeitsfeld ist als zentrale Region des Sichtfeldes modelliert. Das Sichtfeld selbst ist einem Kegel mit einer Öffnung von 40° angenähert, der sich aus der Nasenmulde (Sellion) des menschlichen Gesichts erstreckt. Falls der Roboter sich innerhalb des Kegels befindet, wird die Aufmerksamkeit bestätigt. Die Berechnung erfolgt im Folgenden:

- Definieren eines Einheitsvektors U , der vom Kegelscheitelpunkt (Gesichtspose) entlang der Achse des Kegels zeigt

- Definieren eines Vektors V , der vom Kegelscheitelpunkt (Gesichtspose) zum Roboter zeigt
- Normieren des Vektors auf einen Einheitsvektor U_v .
- Berechnen des Skalarprodukts $U \cdot U_v$: Dies ist der Kosinus des Winkels zwischen U und U_v .
- Falls der Winkel kleiner als die Öffnung des Kegels ist, hat der Mensch den Roboter bemerkt.

Das Ergebnis wird über die Gesamtarchitektur in Abbildung 66 an die entsprechenden Module wie Audio und Gestensteuerung weitergeleitet. Wenn der Mensch den Roboter nicht bemerkt hat, macht sich das Robotersystem durch Töne bemerkbar. Wenn der Mensch den Roboter bemerkt hat, wird der Roboter zuerst stehen bleiben und auf Befehle warten. Der Mensch kann über die Sprachsteuerung oder das Tablet einen Auftrag eingeben oder den aktuellen Auftrag vom Roboter einsehen.

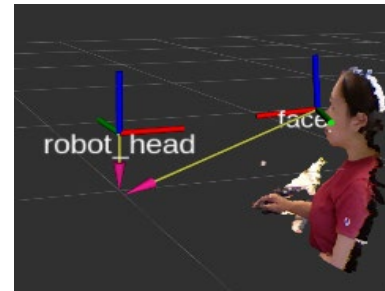


Abbildung 72: Auswertung der Gesichtspose

Arbeitspaket 4.4.3: Anpassung an die Ausführungsweise

Im zweiten Projektjahr wurde ein erster Ansatz für die Anpassung an die Ausführungsweise des Menschen im Rahmen der Teamaufgabe betrachtet. Diesen Ansatz hat Berg et al. für den Anwendungsfall einer stationären Mensch-Roboter-Kooperation weiterentwickelt (Berg et al. 2018). Die HMM ist eine probabilistische Finite-Zustandsmaschine, die als gerichteter Graph dargestellt werden kann, in dem die Knoten den Zuständen und die Kanten den möglichen Übergängen zwischen den Zuständen entsprechen. Jeder Kante ist eine Übergangswahrscheinlichkeit zugeordnet, mit der Einschränkung, dass die Summe der Übergangswahrscheinlichkeiten für Kanten, die aus einem Knoten austreten, zu eins addiert werden muss. Ein Knoten kann einen Übergang zu sich selbst haben. Zusätzlich gibt es eine jedem Zustand zugeordnete Emissionswahrscheinlichkeitstabelle, die die Wahrscheinlichkeit jedes Symbols kodiert „emittiert“ wird, da die Maschine in diesem Zustand ist. Die Situation für die Regallagerkommissionierung wurde im dritten Projektjahr mittels HMM implementiert und evaluiert. Bei dem Anwendungsfall in diesem Projekt ist die Sequenz von Skelettdaten oder OpenPose die beobachtbaren Symbole.

Wie in Arbeitspaket 4.4.2 beschrieben, werden die menschlichen Bewegungsdaten mittels Kinect aufgezeichnet. Merkmale der Kinect-Daten sind die Posen von Kopf, Hals, Rumpfmitte, sowie Hände, Ellbogen, Schulter, Hüfte vom linken und der rechten Seite mit der Dimension 3×11 , wobei 3 die 3D Pose (x, y, z) und 11 die Anzahl von Gelenke sind. Ein Hidden-Markov-Modell für verschiedene Arten von Aktivitäten wurde trainiert. Diese Aktivitäten umfassen: in die Szene eintreten (Bewegung des Körpers vom Eingang des Regallagers zu einer Position am Regal), Objekte suchen (Bewegung des Körpers zu unterschiedlichen Positionen im Regallager und Bewegung des Kopfes), Greifen (Bewegungen der Körperteile und der Hände) und Verlassen der Szene (Bewegung des Körpers von Position im Regallager zum Ausgang). Die Bewegungsdaten bspw. der Hände z.B. beim Greifen oder Suchen von Objekten sind unterschiedlich. Diese Informationen werden als Zeitreihen über ein Training dem HMM zugeführt und können über Ihre Unterschiede erkannt werden.

Die Wirksamkeit eines HMM hängt von der Anzahl der Zustände und der Struktur des Graphen ab, der die Zustände verbindet. Traditionell ist das Vorwissen über ein Problem in dieser Struktur

kodiert. Bei der Wahl einer Struktur gibt es einen Kompromiss zwischen Einfachheit und Komplexität. Ein zu einfaches Modell ist wahrscheinlich nicht in der Lage, den Datensatz mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu erzeugen, während ein zu komplexes Modell den Datensatz leicht erlernen kann, aber wahrscheinlich nicht gut verallgemeinert werden kann. Die Komplexität hängt von der Anzahl der Zustände und der Struktur ab. Die komplexesten Strukturen sind vollständig verbundene Graphen, während die einfachsten lineare Ketten sind. Abbildung 73 zeigt zwei Arten von HMMs, die im Experiment evaluiert wurden. In einem Bakis-HMM haben alle Übergänge von einem Zustand mit höherer Nummerierung in einen Zustand mit niedrigerer Nummerierung eine Wahrscheinlichkeit von Null, im ergodischen Modell gibt es hingegen eine Wahrscheinlichkeit des Übergangs zwischen zwei beliebigen Zuständen.

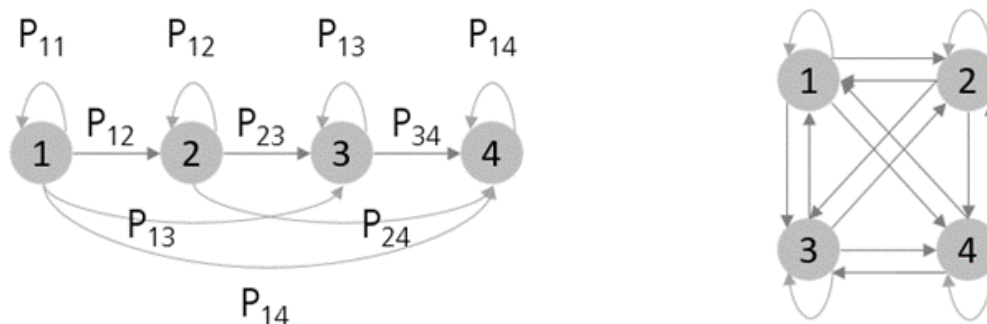


Abbildung 73: Hidden Markov Modelle (Links: Bakis-Modell, Rechts: Ergodisches Modell)

Für jedes Experiment wurden vier Hidden-Markov-Modelle konstruiert, ein Modell für jede Aktivität. Die Parameter der Modelle sind die Anzahl der Zustände, Symbole, Anzahl der Symbole, die Übergangsmatrix mit Übergangswahrscheinlichkeiten und die Emissionsmatrix mit Emissionswahrscheinlichkeiten. Das Ziel des HMM-Trainings ist das Erlernen der Parameter, die das Modell repräsentieren. Am Anfang der Trainingsphase werden die Parameter mit Zufallsdaten initialisiert. Der nächste Schritt ist die Berechnung des Parameters durch einen iterativen Expectation-Maximization (EM)-Algorithmus bis zur Konvergenz. Mit dem erlernten HMM soll ermittelt werden, was der Mensch derzeit macht, z.B. Objekt Greifen oder Regallager verlassen.

Die Keypoints von OpenPose (Abbildung 71) sind die zwei dimensional Positionen auf einem Bild. Das Hidden-Markov-Modell wurde mit Keypoints von OpenPose trainiert. Bevor sie als Trainingsdaten für HMM verwendet werden, müssen die Daten normalisiert werden. Sie zeigen ähnliche Ergebnisse wie Skelette. Über die Ergebnisse kann festgestellt werden, dass auch Body25 für die Intentionserkennung mit HMM geeignet ist. Durch mehr Trainingsdaten kann das Ergebnis verbessert werden.

Bei der Datensammlung werden für jede Aktivität multivariate Zeitfolgen gesammelt. Im Trainingsprozess wird für jede Aktivität ein HMM trainiert. Die Trainingsdaten sind die so genannten Beobachtungen oder Symbole für HMM. Die Anzahl der Symbole ist die Dimension der Merkmale in jedem Rahmen, in unserem Fall 3x11. Das bedeutet, dass eine einzelne variable Zeitfolge ein Symbol darstellt, z.B. die Bewegung des Torsos in der X-Achse. Auf der Grundlage der Trainingsdaten werden Parameter, die das HMM repräsentieren, gelernt, um jede Aktivität zu modellieren. Die

Parameter die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen verschiedenen Zuständen und die Emissionswahrscheinlichkeit von jedem Zustand zum Symbol. In der Testphase wird die Wahrscheinlichkeit einer neuen Sequenz bei verschiedenen HMMs berechnet, wobei diejenige, die die höchste Wahrscheinlichkeit hat, die vorhergesagte Aktivität ist.

Nach dem Erlernen der Hidden-Markov-Modelle kann eine neue Aktion durch die Berechnung der maximalen Wahrscheinlichkeit vorhergesagt werden. Die durchschnittliche Erkennungsgenauigkeit liegt bei über 70 %. Mit den erkannten menschlichen Aktivitäten kann sich der Roboter besser an verschiedene Szenarien anpassen. Im Use Case Regallagerkommissionierung kann folgendes Szenario auftreten: der Mensch steht im Regallager und der Roboter hat gleichzeitig die Aufgabe, in das Regallager einzufahren und ein Objekt abzuholen. Sobald der Roboter erkannt hat, dass der Mensch im Regallager steht und nach einem Objekt sucht, welches er noch nicht gefunden hat, soll sich der Roboter dem Menschen bemerkbar machen und anschließend in das Regallager einfahren, um seine eigene Aufgabe auszuführen. Erkennt der Roboter, dass der Mensch dabei ist, das Regallager zu verlassen, so wartet der Roboter und fährt anschließend ins Regallager.

Tabelle 6: Auswertung der Hidden Markov Modelle

| Erkennungsgenauigkeiten (Cross-Validation 2-Fold) | Bakis-Modell | Ergodisches Modell |
|--|--------------|--------------------|
| Skelettdaten der Kinect | 72.5 % | 77.8 % |
| Body25 (OpenPose) | 76.4 % | 75.2 % |

Die Auswertung zeigte, dass die beiden Modelle bei der gegebenen Aufgabe ähnlich gut funktionieren. Das Bakis-Modell erfordert jedoch weniger Rechenaufwand aufgrund des Architekturentwurfs. Daher wird das Bakis-Modell für die Umsetzung verwendet. Die Untersuchungen zur Erkennung der Aktivitäten zeigten, dass die Aktivitäten "in das Regallager eintreten" und "Greifen" erfolgreich erkannt werden können, aber die Aktivitäten "Objekt nicht gefunden" und "Regallager verlassen" zum Teil fälschlicherweise als die andere Aktivität eingestuft werden. Der Grund dafür könnte sein, dass die Merkmale nicht eindeutig genug sind, um die beiden Aktivitäten voneinander zu trennen. In Zukunft können weitere Merkmale aus dem RGB-Bild integriert werden, um das Modell zu trainieren.

Arbeitspaket 4.4.4: Eingriffsmöglichkeiten und Hilfeunterstützung für den Menschen

Im Rahmen von inhaltlichen Diskussionen im dritten Projektjahr wurde festgestellt, dass das Robotersystem in komplexe Situationen gelangen kann, aus denen es sich selbst nicht befreien kann. Dies kann beispielsweise ein Hindernis im Weg sein, an dem der Roboter nicht vorbeifahren kann oder ein verfehltes Objekt während eines Greifvorgangs. Dies sind die Fehlerfälle, die im einleitenden Abschnitt beschrieben wurden, die zu einer ad-hoc Kooperation zwischen Mensch und Roboter führen. Aus dieser Situation kann ein Roboter entweder durch einen anwesenden Menschen oder über eine Teleoperation befreit werden. Bei Auftritt eines Fehlers wird zunächst das Planungs- und Steuerungssystem benachrichtigt. Dieses leitet ein Signal an das Interaktionsmodul,

das zu einer Ausgabe am Roboter führt. Dafür gibt es verschiedene Schnittstellen: Projektor, Audio, Smart Watch sowie Tablet. Meldet sich kein Mensch, so wird der Fall an das Teleoperationssystem weitergegeben. Im Falle eines anwesenden Menschen, der unter Umständen keine Expertenkenntnis für Robotersysteme besitzt, muss der Mensch durch eine Anleitung dabei unterstützt werden, den Roboter zu befreien. Mit der Anleitung kann ein Non-Expert nicht gravierende Fehler beheben und das System wieder für die Produktion einsatzbereit machen. Falls der Fehler komplex zu beheben ist, sollte der Bediener den Hersteller informieren. Am geeigneten Eingabemedium kann der Bediener schrittweise die Anleitung zur Fehlerbehebung durchführen und nach jedem Schritt ein Feedback an das Robotersystem geben. Das Konzept zur Behandlung eines Fehlers wird auf Grundlage des Arbeitsschritts, während dessen der Fehler aufgetreten ist, erstellt. Kommt es bspw. zu einer Kollision, während

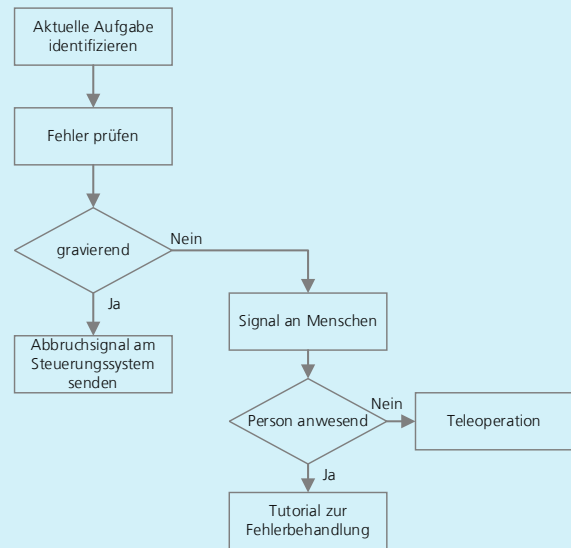


Abbildung 74: Vorgehen des Gesamtsystems bei Auftritt eines Fehler

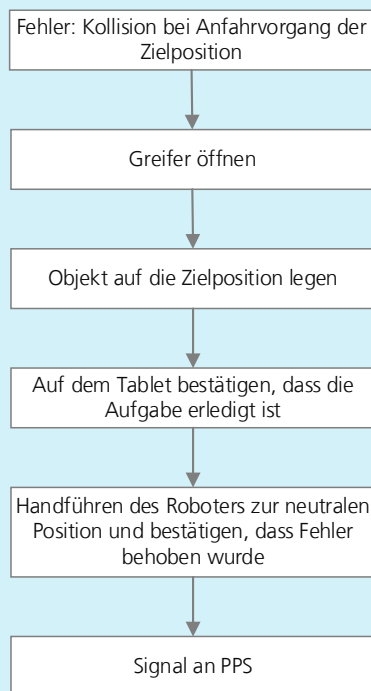


Abbildung 75: Anleitung zur Fehlerbehebung bei einem Platziervorgang

der Roboter ein Objekt gegriffen hat, so muss zur Behandlung zunächst das Objekt sicher sein, dann wird der Greifer geöffnet. Die erarbeiteten Konzepte wurden in TP 5 graphisch realisiert und von der Firma Teamware GmbH auf dem Tablet implementiert. Der Ablauf der Fehlerbehebung ist in Abbildung 74 dargestellt. Das Planungs- und Steuerungssystem erhält die Fehlermeldung und entscheidet basierend darauf, ob es sich um einen gravierenden Fehler handelt, der nicht einfach behoben werden kann, z. B. ein Bruch des Greifers, oder ein Fehler, der durch ein Tutorial oder eine Teleoperation behandelt werden kann.

Tutorials wurden beispielhaft in der Tablet-Applikation implementiert. Abbildung 75 zeigt den Ablauf einer Fehlerbehebung anhand eines Ablegevorgangs. Die Person wird dabei schrittweise durch den Vorgang geführt und quittiert die durchgeführten Aktionen.

Die Umsetzung des Tutorials zeigt die nachfolgende Abbildung 76.

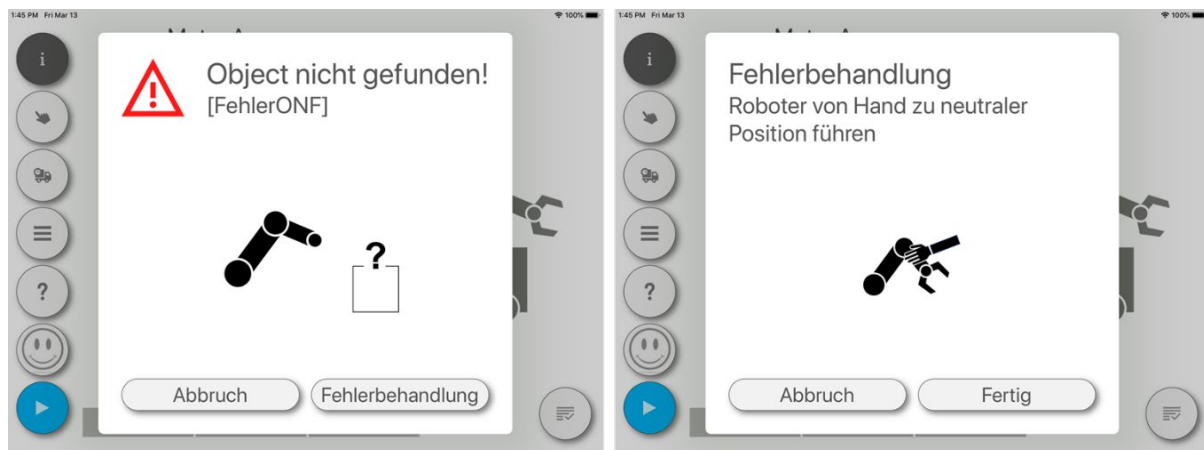


Abbildung 76: Umsetzung des Fehlertutorials in der Tablet-Applikation



Abbildung 77: Eingabe des Feedbacks zur Zusammenarbeit über Tablet

Um von den nutzenden Personen zu erfahren, ob die Zusammenarbeit zur Zufriedenheit ablief oder ob es Verbesserungsbedarf gibt, wurde eine Feedback-Schaltfläche eingeführt (siehe Abbildung 77). Über diese kann die Werkkraft schnell Feedback geben, ob die Interaktion erfolgreich war. Dies wurde nur prototypisch implementiert und zeigt Bedarf für kommende Forschungsvorhaben auf.

4.4.4 Kooperation mit anderen Teilprojekten

Kooperation mit Teilprojekt 2

Mit Teilprojekt 2 erfolgte die Zusammenarbeit unter anderem im Bereich der Menscherfassung. Dabei werden Sensoren eingesetzt, um den Menschen erfassen zu können, die über das Teilprojekt 2 in das Gesamtsystem verankert werden. Während TP 2 sich insbesondere mit der Erkennung eines Menschen aus der Ferne beschäftigt, liegt der Fokus im TP 4 auf der detaillierten Erfassung der Körperhaltung des Menschen, um dessen Status festzustellen.

Weitere Schnittpunkte finden sich in der Bahnplanung des Roboters, die sowohl für die Teleoperation, die Programmierung des Roboters als auch die gemeinsame Aufgabendurchführung relevant ist. Ebenso für TP 4 von Relevanz sind die von TP 2 bereitgestellten Fähigkeiten zur Umgebungserfassung auf Basis verschiedener Sensoren sowie zur Bewegungssteuerung der Roboter und zur Ansteuerung von Betriebsmitteln.

Gemeinsam wurden von TP 4 und TP 2 Möglichkeiten zur Umgebungsmodellierung untersucht und umgesetzt. Beispielsweise setzt das im Interventionsszenario eingesetzte Teleoperationssystem bezüglich der Augmented Reality stark auf die durch TP 2 erfassten und in der Umgebungsmodellierung bereitgestellten Informationen zu erkannten Objekten.

Kooperation mit Teilprojekt 3

Mit dem Teilprojekt 3 arbeitete das Teilprojekt 4 zusammen, um die Verbindung zwischen den Interaktionstechnologien und dem Steuerungs- und Planungssystem zu identifizieren und umzusetzen. So müssen die Aktionen, die durch Eingaben mit Hilfe der Interaktionsmöglichkeiten initiiert werden, in dem Planungs- und Steuerungssystem interpretiert und verwendet werden. Insbesondere im dritten Jahr erfolgte eine engere Zusammenarbeit bei Betrachtung der ad-hoc Fähigkeiten, wie der Eingabe von Sonderaufträgen oder der Behandlung von Fehlerfällen. Bei der Behandlung der Fehlerfälle muss das Steuerungssystem eine Meldung an den Werker initiieren und mit Hilfe der Interaktionssysteme umsetzen. Durch einen Dialog zwischen Steuerungssystem und Interaktionstechnologien werden die Eingaben des Nutzers verwertet.

Kooperation mit Teilprojekt 5

Die Zusammenarbeit zwischen Teilprojekt 4 und Teilprojekt 5 war während des gesamten Projekts sehr eng. Das Teilprojekt 5, zuständig für Nutzerstudien und Evaluation, führte diese in gemeinsamer Abstimmung mit Teilprojekt 4 durch. So entstand im ersten Jahr eine Nutzerstudie zur Auswertung von Gesten, die im zweiten Jahr nach deren Implementierung auf andere Art und Weise wieder durchgeführt wurde. Die implementierten Technologien des Rück-Kanals wurden ebenfalls in einer Nutzerstudie evaluiert. Die Erkenntnisse der Studien wiederum wurden anschließend in Teilprojekt 4 verarbeitet und in die Implementierung einbezogen.

4.4.5 Veröffentlichungen

In Teilprojekt 4 sind folgende Veröffentlichungen im Rahmen des Forschungsprojektes entstanden:

- Colceriu, C.; Riedl M.; Henrich, D.; Nitsch, V. ; Brell-Cokcan, S.: "User-Centered Design of an Intuitive Robot Playback Programming System", Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics, Bayreuth, 2020
- Riedl, M.; Orendt, E. M.; Henrich, D.: "Sensor-Based Loops and Branches for Playback-Programmed Robot Systems", 26th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD), Turin, 2017
- Riedl, M.; Henrich D.: "Guiding Robots to Predefined Goal Positions with Multi-Modal Feedback", 50th International Symposium on Robotics (ISR), Munich, 2018
- Riedl, M.; Henrich D.: "A Fast Robot Playback Programming System Using Video Editing Concepts", Tagungsband 4. Kongress Montage Handhabung Industrieroboter, Dortmund, 2019
- Riedl, M.; Henrich D.: "Scalable Visual Representation of Sensor-Based, Nested Robot Programs", The Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), Virtual, 2020, accepted for publication
- Kohn S, Blank A, Puljiz D, Zenkel L, Bieber O, Hein B, Franke J: "Towards a Real-Time Environment Reconstruction for VR-Based Teleoperation Through Model Segmentation", 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) Madrid, 2018
- Blank, A.; Qiang, G.; Kosar, E.; Karlidag, E.; Kohn, S.; Sommer, O.; Querfurth, F.; Merz, N.; Metzner, M.; Sessner, J.; Lieret, M.; Walter, J.; Franke, J.: "Hybrid Environment Reconstruaction Improving User Experience and Workload in Augmented Virtuality Teleoperation", IEEE 7th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Singapore, 2021, accepted for publication

- Berg, J.; Lottermoser, A.; Richter, C.; Reinhart, G. Human-Robot-Interaction for mobile industrial robot teams. In: 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. p. 614–619. doi:10.1016/j.procir.2019.02.080.
- Berg, J.; Lu, S.: Review of Interfaces for Industrial Human-Robot Interaction in Current Robotics Reports. Vol. 1 2, 2020. S.27–34. DOI: 10.1007/s43154-020-00005-6
- Blank A., Zikeli, L.; Sommer, O.; Franke, J.; Berg, J.; Lu, S.; Reinhart, G.: Entstörungsstrategie für autonome mobile Roboter in Wt Werkstatttechnik online 9-2020, 2020. S.613-618
- Lu, S.; Berger, J.: A Multimodal Human-Robot Interaction System for Human Detection and Activity Recognition (Abstract submitted für CIRP ICME 2020)

4.4.6 Literaturverzeichnis

Berg, Julia; Reckordt, Tim; Richter, Christoph; Reinhart, Gunther (2018): Action Recognition in Assembly for Human-Robot-Cooperation using Hidden Markov Models in Procedia CIRP. Tianjin, China 2018, 10.1016/j.procir.2018.02.029.

Cao, Zhe; Hidalgo, Gines; Simon, Tomas; Wei, Shih-En; Sheikh, Yaser (2018): OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields. In arXiv preprint arXiv:1812.08008, 2018

Hartwig J. (2019): Playback-Programmierung hybrider kraft- und positionsgeregelter Roboter-Bewegungen mittels zusätzlicher Kraft-Sensorik. Projektarbeit. Lehrstuhl Angewandte Informatik III, Universität Bayreuth (2019)

Lemaignan, Severin; Garcia, Fernando; Jacq, Alexis; Dillenbourg, Pierre (2017): From real-time attention assessment to “with-me-ness” in human-robot interaction. In Proceedings of 10th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (IEEE, 2017)

Liam Zinth, Maximilian Klimm, Lukas Edelböck, Hanne Beuter (2019): Konzept und Umsetzung eines Dialogkonzepts zur Mensch-Maschine-Interaktion, Projektarbeit, Fraunhofer IGCV

Mohs C., Naumann A., Meyer H., Pohlmeyer A. (2006): IUUI Intuitive Use of User Interfaces. In: Proceedings of the 4th annual GC UPA Track; Gelsenkirchen (2006)

Ohr, Kevin (2020): Development and implementation of a multimodal human-machine interaction system for a mobile robot platform, Hochschule Augsburg (2020)

Riedl M., Baumgartl J., Henrich D. (2016): Editing and Synchronizing Multi-Robot Playback Programs. 47th International Symposium on Robotics (ISR), Munich (2016)

Shen, Yi (2015):, System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage, München, Herbert Utz Verlag, 978-3-8316-7167-0 2015.

Siegl A. (2019): Gestaltung einer Benutzerschnittstelle zur intuitiven Roboterprogrammierung. Projektarbeit. Lehrstuhl Angewandte Informatik III, Universität Bayreuth (2019)

Solihin Y. (2015): Fundamentals of Parallel Multicore Architecture. Chapman & Hall/CRC. ISBN 978-1482211184. (2015)

Zühlke D.:(2012) Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (2012)

4.5 Teilprojekt 5 - Empirische Nutzerevaluation

Benedikt Leichtmann, Christian Colceriu, Tobias Hellig, Katharina Schäfer, Verena Nitsch

4.5.1 Allgemeine Angaben

Beteiligte Industriepartner:

- Krones AG
- MAN Truck & Bus AG
- Mayser Sicherheitstechnik GmbH
- Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG
- SALT Solutions AG
- Yaskawa Europe GmbH, Robotics Division

Projektleitung:

Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch, Institut für Arbeitswissenschaft, RWTH Aachen University

4.5.2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Industrielle Arbeitsplätze, an denen Personen eng mit Robotern zusammenarbeiten, bieten die Möglichkeit, menschliche Fähigkeiten und Fertigkeiten mit den präzisen Funktionen von Robotern zu kombinieren, um so die Fertigung effizienter zu gestalten und gleichzeitig Personen zu entlasten. Da hier keine trennenden Schutzeinrichtungen vorhanden sind, die den Menschen vor Kollisionen mit dem Roboter schützen, ist es notwendig, ein Nutzungskonzept für diese Arbeitsplätze zu erstellen, welches sich weder auf die Sicherheit, noch die Produktivität oder Nutzerakzeptanz negativ auswirkt. Mit diesem Ziel wurden im TP 5 über die Dauer der Projektlaufzeit fünf Themengebiete der Mensch-Roboter-Kooperation untersucht:

1. *die Rolle des kooperierenden Roboters im Arbeitssystem,*
2. *der Einfluss von Roboterbewegungen auf den Nutzer,*
3. *die nutzergerechte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter,*
4. *intuitive Mensch-Roboter-Schnittstellen sowie*
5. *Multi-level Einflüsse auf die Mensch-Roboter-Interaktion.*

Um eine menschengerechte Entwicklung der kooperativen Roboter-Systeme zu ermöglichen, wird gemäß DIN EN ISO 9241-210 ein benutzerzentrierter Entwicklungsprozess im Forschungsverbund verfolgt (ISO 9241-210:2010). Hierbei ist es Aufgabe des TP 5, den Entwicklungsprozess im Forschungsverbund mit Hilfe iterativer, empirischer Evaluationen und arbeitswissenschaftlichen Wissensstand zu unterstützen. Von den Untersuchungen werden evidenzbasierte Gestaltungsempfehlungen abgeleitet.

4.5.3 Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss

Im ersten Projektjahr konnte in AP 5.1. eine empirische Arbeitssystemanalyse als Grundlage weiterer Studien und Empfehlungen erfolgreich abgeschlossen werden. Zusätzlich wurde im Rahmen von AP 5.4.1. (User-Interface Design) eine Laborstudie zur Identifikation von intuitiven Gesten zur Gestensteuerung des Robotersystems durchgeführt.

Im zweiten Projektjahr wurde im Rahmen von AP 5.2.1. ein Literatur-Review inklusive Meta-Analyse zum Wohlfühlabstand bei der Mensch-Roboter-Interaktion durchgeführt und um theoretische Überlegungen ergänzt. Aufbauend darauf wurde ein Laborexperiment (AP 5.2.2.) konzipiert, dessen Durchführung im dritten Projektjahr erfolgte. Zusätzlich wurde im zweiten Projektjahr die Aufgabenallokation (AP 5.3.1.) durch eine teilnehmende Feldbeobachtung konzipiert. Die identifizierten Gesten aus der Studie vom ersten Projektjahr wurden in einer weiteren Studie validiert und um weitere Gesten ergänzt (AP 5.4.1.). Zusätzlich wurde die Projektion des Fahrtweges im Kontext von Kreuzungsszenarien als weiterer Bestandteil des Interfaces in einer Laborstudie ebenfalls im zweiten Projektjahr evaluiert (AP 5.4.1.). Im Rahmen von AP 5.5. wurden hauptsächlich konzeptionelle Arbeiten in Vorbereitung auf die summativen Evaluationen und Bewertung der Gesamtevaluation geplant. Im Zuge dessen wurde auch ein Fragebogen zur Messung der Einstellung von Werkskräften entwickelt.

Im abgeleisteten dritten Projektjahr (bis zum Berichtszeitpunkt) konnten fast alle Arbeitspakete zum Abschluss gebracht werden. Die im zweiten Jahr konzipierte Laborstudie zu Wohlfühlabständen (AP 5.2.2.) wurde erfolgreich durchgeführt und ausgewertet. In AP 5.5.3. wurde die Fragebogenstudie zur Einstellung von Werkskräften abgeschlossen. In AP 5.4.1. erfolgte die Evaluation eines interaktiven Mockups zur Playback-Programmierung durch die Krones AG. Zur summativen Evaluation wurden in AP 5.2. zwei Risikoanalysen durchgeführt und in AP 5.1. wurden eine Tagebuchstudie sowie eine Interviewstudie für eine Testphase der Roboterplattform bei Anwenderunternehmen konzipiert und geplant, deren Durchführung bis zum Berichtszeitpunkt noch nicht abgeschlossen war.

Arbeitspaket 5.1: Empirische Arbeitssystemanalyse

Vor der Entwicklung einer Technologie ist eine genaue Analyse des Einsatzkontexts inklusive physischer Umwelt, der Nutzer*innen, bis hin zum ganzen System, in das der Interaktionskontext eingebettet ist, unabdingbar. Ohne eine solche Berücksichtigung des Kontexts, kann die Einführung einer neuen Technologie schnell zu nicht-intendierten, negativen Konsequenzen führen (Tenner 1997) wie beispielsweise erhöhtes Stresslevel oder verminderte Produktivität (Tarafdar, Tu & Ragu-Nathan 2010). Anstatt allerdings Nutzereigenschaften oder Aufgabenanforderungen einzeln und isoliert zu untersuchen, sollte das Arbeitssystem als Ganzes betrachtet werden. Ein Arbeitssystem beschreibt in diesem Zusammenhang dynamische, soziotechnische und stark vernetzte offene Systeme, die ein oder mehrere Arbeitskräfte, die Ausstattung, Funktionen, Aufgaben und Umgebungsfaktoren eines jeweiligen Arbeitsplatzes beinhalten (DIN EN ISO 6385:2016). In Arbeitspaket 5.1 wurde daher entsprechend in Zusammenarbeit mit TP 1 eine arbeitswissenschaftliche Arbeitssystemanalyse in den Anwenderunternehmen des Verbundes durchgeführt. Diese Arbeitssystemanalyse sollte eine erste Grundlage für empirisch-begründete Gestaltungsentscheidungen bilden. Dafür wurden arbeitsbegleitende Beobachtungsinterviews, Dokumentenanalysen, Bilddokumentation, Videos und Fragebögen genutzt, um mögliche Risiken und Potenziale zu identifizieren. Hierfür wurden vorrangig einzelne passende Module aus den Leitfäden RIHA/VERA (Oesterreich, Leitner & Resch 2000) und KOMPASS (Grote, Wäfler, Ryser & Weik 1999) zur systematischen Analyse verwendet und teilweise ergänzt, mit denen sich der Anwendungsfall am besten abbilden ließ. Insgesamt wurden so 12 Arbeitskräfte aus 4 Arbeitssystemen aus 3 Unternehmen jeweils von Teams bestehend aus 2 Personen (1 Arbeitspsycholog*in und 1 Ingenieurwissenschaftler*in) begleitet. Die Analyse und Auswertung wurde als Basis für weitere Arbeiten im ersten Projektjahr erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 5.2: Nutzeroptimale Roboterbewegungen

Zur Beschreibung menschengerechter Roboterbewegungen, wurde zunächst eine intensive, systematische Literaturanalyse und Meta-Analyse bestehender Forschungsergebnisse durchgeführt und um theoretische Überlegungen ergänzt (AP 5.2.1.). Aufbauend darauf sollten durch eine Laborstudie diese Erkenntnisse erweitert (AP 5.2.2.) und in einem dritten Schritt über diese theoretischen und empirischen Befunde Empfehlungen für den konkreten Anwendungsfall des Forschungsverbundes abgeleitet werden (AP 5.2.3.). In diesem Zusammenhang wurde sich vorrangig auf den Aspekt der Wohlfühldistanz und Distanzverhalten konzentriert.

Arbeitspaket 5.2.1: Analyse relevanter Bewegungsvariablen

Wenn sich Mensch und Roboter gemeinsame Arbeitsräume teilen, ist eine nutzerfreundliche, sichere Roboterbewegung unerlässlich. Hierbei können beispielsweise sozial unangemessene Abstände zueinander („Spatial invasion“ nach Aiello 1987) zu Unwohlsein führen und dadurch zu vermeidenden Verhaltensweisen oder Rückzug. Eine systematische Literaturanalyse sollte Aufschluss geben, welche Einflussfaktoren vorrangig bei der Gestaltung des Wohlfühlabstandes bei einer nutzerfreundlichen Navigation berücksichtigt werden sollten, und welche aufgrund geringer Effektstärke vernachlässigbar sind. Hierbei ist der Wohlfühlabstand als dynamisches Kontinuum zu verstehen, welches sich maßgeblich je nach Situation durch verschiedene Beziehungskonstellationen und Umwelteinflüsse verändert (Aiello 1987). Zentral sind hierbei Rahmentheorien, mit denen menschliches Distanzverhalten über die zugrundeliegenden Mechanismen und entsprechend die Wirkung verschiedener Einflussfaktoren erklärt werden können. Nur solche Theorien ermöglichen es, Wohlfühldistanzen menschlicher Nutzer*innen abzuschätzen, ohne diese für alle mögliche Faktor-Konstellationen mit einer schier unendlichen Anzahl an Einflussfaktoren erneut testen zu müssen (Gillespie & Leffler, 1983; Muthukrishna & Henrich 2019). Gillespie und Leffler (1983), sowie Aiello (1987) beschreiben dabei verschiedene Theorien und Modelle zur Erklärung von Wirkursachen (*causa efficiens*), die grob auf drei Zweckursachen (*causa finalis*) zurückzuführen sind: (1) Bei der *Schutzfunktion* ist Distanzverhalten eine Folge von Flucht- oder Kampfverhalten infolge von wahrgenommener Gefahr, (2) bei der *Arousal Regulationsfunktion*, wird Distanz als eine mögliche Strategie genutzt, um die Menge an Reizen und Informationen zu kontrollieren und so Überstimulation zu verhindern, und (3) bei der *Kommunikationsfunktion* stellt Distanzverhalten eine soziale Information dar, beispielsweise über die Beziehung zwischen zwei sozialen Akteuren. Je nach Situation können also bestimmte Einflussfaktoren über die Funktionen allgemein, und über konkrete Wirkmodelle im Speziellen erklärt werden. Über eine systematische Literaturanalyse wurden die zentralen in der Literatur genannten Einflussfaktoren auf die Wohlfühldistanz speziell in der Mensch-Roboter-Interaktion zusammengefasst und mit theoretischen Überlegungen ergänzt, sowie Probleme und Lücken in diesem Forschungsgebiet identifiziert. Über meta-analytische Betrachtungen wurde darüberhinausgehend der Einfluss einzelner Variablen auch quantitativ veranschaulicht. Dafür wurden die Literaturdatenbanken Web of Science und Scopus, sowie die Suchmaschine Google Scholar nach Literatur durchsucht. Insgesamt wurden 15026 Artikel einem Screening unterzogen, die dann über Ausschlusskriterien (z.B. sollte die Stichprobengröße größer 10 Versuchspersonen sein u.ä.) auf $k = 27$ geeignete Artikel mit insgesamt $N = 1299$ Versuchspersonen reduziert wurden.

Die untersuchten Studien zeigten für die einzelnen Faktoren eine sehr durchwachsene Datenlage. Besonders für personenbezogene Faktoren wie Alter, Gender oder Persönlichkeit konnten keine

soliden Ergebnisse erzielt werden. Die Studien zeigten teils erhebliche theoretische oder methodische Mängel (z.B. geringe statistische Power, geringe Versuchspersonenzahl). Am konsistentesten waren Ergebnisse zur Erfahrung der Nutzer*innen mit Robotern - hier zeigte sich, dass mit zunehmender Erfahrung der Abstand gegenüber dem Roboter abnahm. Zu Umgebungsfaktoren wie Raumgröße oder externen Stressoren wie Lärm wurde keine Studie identifiziert. In der Meta-Analyse konnte über alle Studien hinweg ein mittlerer Wohlfühlabstand von 81,61 cm ermittelt werden mit einem 95 % Konfidenzintervall von [69,21; 94,00] cm. Die Meta-Analyse zeigte keinen signifikanten Gender-Effekt – so war die mittlere Effektstärke zwar $d = .37$, streute aber sehr breit (95 %-KI = [-.20; .94]). Dies legt nahe, dass es keinen oder nur einen vernachlässigbar kleinen Unterschied zwischen weiblichen und männlichen Personen im Wohlfühlabstand gegenüber Robotern gibt. Auch die anderen Faktoren wie das Erscheinungsbild des Roboters oder das Subjekt der Annäherung erzielten keine statistische Signifikanz. Wegen vieler theoretischer und methodischer Mängel, sind Ergebnisse von Einzelstudien daher nur mit Vorsicht zu interpretieren. Diese Erkenntnisse wurden im *Journal of Environmental Psychology* veröffentlicht (Leichtmann & Nitsch 2020). Diese allgemeinen Erkenntnisse zu optimalen Distanzen gegenüber menschlichen Nutzer*innen können genutzt werden, um über die theoretischen Modelle konkrete Designentscheidungen für einen Bewegungsalgorithmus in den Anwendungsszenarien des Forschungsverbundes abzuleiten (siehe AP 5.2.3.). Zusätzlich dienen sie zur Formulierung konkreter Hypothesen in der Nutzerstudie von AP 5.2.2.

Arbeitspaket 5.2.2: Nutzerstudie zu optimalen Bewegungen

Auf Basis der Ergebnisse des Reviews und der Meta-Analyse (AP 5.2.1.) und auf Basis der Arbeitssystemanalyse (5.1.) wurde eine Nutzerstudie konzipiert zur Analyse von Situations-spezifischen Einflussfaktoren im Anwendungskontext von FORobotics, und zu Einflussfaktoren, deren Einfluss bisher noch kaum auf Basis der bisherigen Literatur abgeleitet werden können. Die Nutzerstudie wurde überwiegend im dritten Förderjahr vorbereitet (z.B. Beantragung des Ethikvotums im April und Versuchsaufbau im Juni 2019) und durchgeführt (von Juli bis September 2019).

Theoretischer Hintergrund und Fragestellung

Wie aus der Arbeitssystemanalyse hervorging, unterscheiden sich die Arbeitssysteme fundamental in den Umgebungsfaktoren, unter anderem in der Größe des verfügbaren Raumes. Beispielsweise wurden in Lagerumgebungen unterschiedliche Gangbreiten festgestellt. Darüber wurden auch Gänge beschrieben, bei denen herausragendes Material oder Vorrichtungen wie Leitern oder Kommissionier-Wagen schnell zu potenziellen Hindernissen in den Gängen werden könnten. Im systematischen Literatur-Review (AP 5.2.1.) wurden jedoch keine Studien gefunden, die Effekte von Umgebungsfaktoren im Zusammenhang der Mensch-Roboter-Interaktion untersuchten. Lediglich basierend auf Studien aus der sozialen Mensch-Mensch Interaktion kann vermutet werden, dass engere Räume zu größerem Wohlfühlabstand führen (beispielsweise Sundstrom 1975). Diese Ergebnisse können zweckursächlich über die Schutzfunktion und die Arousal-Regulations Funktion, und wirkursächlich beispielsweise über das Modell interner Zustände erklärt werden. Ein schmalere Raum lässt weniger Fluchtmöglichkeiten, was somit im Falle von Gefahr ein Sicherheitsrisiko darstellt. Ein größerer Abstand stellt so eine Strategie zur Erhöhung der Sicherheit dar. Bei Näherkommen des Gegenüber würde zudem die durch die Einengung gering eingeschätzte Kontrollierbarkeit der Situation abnehmen und auf emotionaler Ebene das Arousal (Grad der Erregung) ansteigen. Der größere Abstand wirkt also als Strategie, die Kontrollierbarkeit wieder zu erhöhen und das Arousal zu senken. Diese Erklärung fokussiert wirkursächlich zwei Konstrukte:

Eine Veränderung in 1) der wahrgenommenen Kontrollierbarkeit der Situation und 2) im Arousal, die als Mediatoren zur Veränderung des Wohlfühlabstands führen. Als Moderator ist das Gefahrenpotenzial des Gegenübers zu kontrollieren. Daraus ergeben sich folgende Hypothesen (Mediation):

- H1: Je enger der Raum, desto geringer die wahrgenommene Kontrollierbarkeit und desto größer das Arousal (Stress)
- H2: Je geringer die wahrgenommene Kontrollierbarkeit und je größer das Arousal (Stress), desto größer der Wohlfühlabstand
- H3: Je enger der Raum, desto größer der Wohlfühlabstand

In vielen Studien wird zur Untersuchung des Wohlfühlabstandes ein sogenanntes Stopp-Distanz-Verfahren genutzt, bei der Personen in einer experimentellen Situation von einem Gegenüber (hier ein Roboter) angenähert werden und über ein Stoppsignal die Grenze anzeigen sollen, ab der sie sich nicht mehr wohl fühlen. Im Vergleich zu solchen Laborsituationen haben aber in realen Umgebungen und insbesondere im Arbeitskontext der Produktion Personen zusätzliche Nebenaufgaben und somit eine erhöhte Arbeitsgedächtnisbelastung. Eine solche erhöhte Arbeitsgedächtnisbelastung könnte in Situationen der Mensch-Roboter-Interaktion zusätzlich das Arousal von Personen erhöhen. Somit wäre der oben beschriebene Zusammenhang zwischen Raumenge und Wohlfühlabstand von Werkskräften als noch kritischer zu beurteilen. Diese Annahme würde bedeuten:

- H4: Je höher die Arbeitsgedächtnisbelastung, desto höher das Arousal (Stress)
- H5: Je höher die Arbeitsgedächtnisbelastung, desto größer der Wohlfühlabstand

Das Mediationsmodell ist in Abbildung 78 dargestellt.

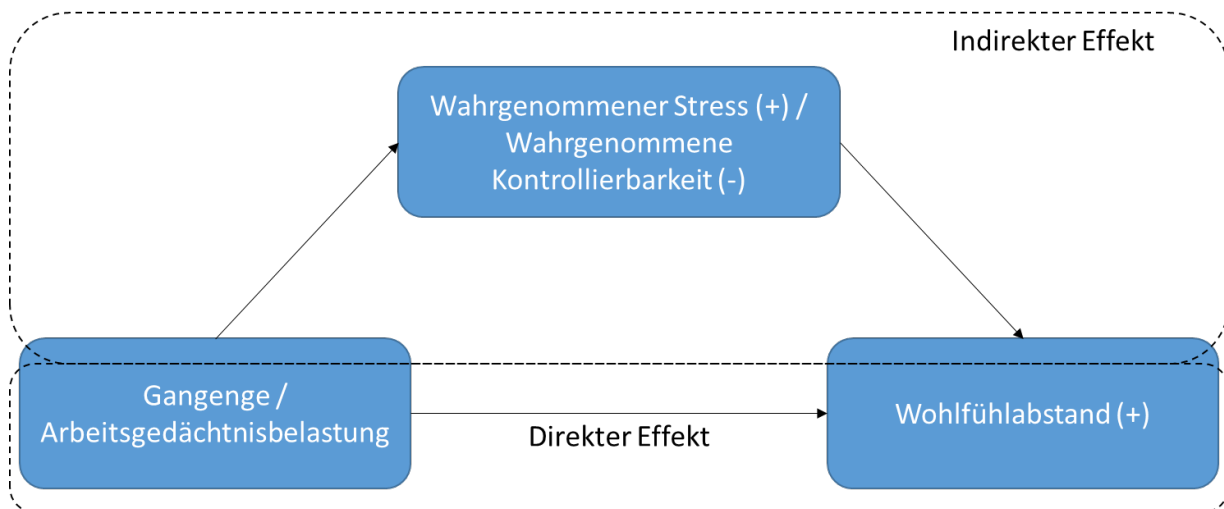


Abbildung 78: Mediationsmodell. Der Einfluss der Gangenge bzw. der Arbeitsgedächtnisbelastung als direkter Effekt auf den Wohlfühlabstand wird durch wahrgenommenen Stress und wahrgenommene Kontrollierbarkeit als indirekter Effekt mediert.

Methodik

Zur Untersuchung der Hypothesen wurde eine Laborstudie mit einem 3x2 Within Subject Design durchgeführt. Als unabhängige Variablen wurden 1) die Raumenge in 3 Stufen mit steigender Gangverengung (breiter Gang mit offenem Rücken, enger Gang mit offenem Rücken, enger Gang mit versperrtem Rücken), und 2) die Arbeitsgedächtnisbelastung (mit kognitiver Nebenaufgabe, ohne kognitive Nebenaufgabe) manipuliert. Als abhängige Variablen wurden der Wohlfühlabstand gegenüber dem Roboter, subjektiv wahrgenommene Kontrolle über die Situation, Stress (Arousal), Engegefühl und Sicherheitsempfinden gemessen. Zusätzlich wurden noch weitere Konstrukte für explorative Analysen erfasst, die jedoch hier nicht weiter vertieft werden sollen.

Auf Basis einer Power-Analyse wurden Daten von $N = 72$ Versuchspersonen erhoben. Von den 72 Versuchspersonen waren $n_w = 36$ Personen weiblicher, $n_m = 36$ männlicher und keine Person diverser oder anderer Geschlechtsidentität ($n_d = 0$). Das mittlere Alter der Versuchspersonen betrug $M = 30,42$ ($SD = 12,22$) Jahre. Dabei gaben 57 Versuchspersonen an, entweder noch nie oder nur wenige Male mit Robotern interagiert zu haben.

Insgesamt bestand das Experiment aus 3 Teilen. In einer ersten Einführungsphase wurden die Versuchspersonen über den Ablauf des Versuchs, der Sicherheitsvorkehrungen und weiterer Rahmenbedingungen zu Teilnahmevoraussetzungen und Datenschutz aufgeklärt. Nach der Einwilligung der Versuchspersonen zur Teilnahme, wurden demographische Angaben zur Person und zur Vorerfahrung mit Robotern gesammelt. Anschließend begann der experimentelle Teil. In insgesamt 6 Durchgängen mit unterschiedlichen Bedingungen fuhr die Roboterplattform in einem einer Lageumgebung nachgeahmten Gang aus Rollregalen mit 2,62m Entfernung von der Versuchsperson gerade auf diese zu, während die Versuchsperson auf einem markierten Punkt stehen blieb. Sobald sich die Versuchsperson begann durch die Annäherung unwohl zu fühlen, wurde die Versuchsperson angehalten durch einen lauten Stopp-Ruf, das Anhalten des Roboters zu signalisieren. Daraufhin hielt der Roboter sofort an und der Abstand zwischen Roboter und Standpunkt der Versuchsperson wurde gemessen (Stopp-Distanz-Verfahren). Der Gang war insgesamt 3 Meter lang und die Regale waren mit verschiedenen Kartons und Kisten bestückt und zwischen 1,76 bis 2,02m hoch. Nach jedem Durchgang füllte die Versuchsperson Fragebögen aus, während der Roboter für den nächsten Versuch auf seine Ausgangsposition zurückgefahren wurde. Die auszufüllenden Fragebögen waren im Einzelnen:

- 1) Ein eigens entwickelter Fragebogen zur wahrgenommenen Kontrollierbarkeit der Situation (4 Items),
- 2) ein eigens entwickelter Fragebogen zum Engegefühl (5 Items),
- 3) Stressempfinden über Einzelitems des Mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogens nach Steyer, Notz, Schwenkmezger und Eid (1997) (8 Items),
- 4) Sicherheitsempfinden nach Einzelitems der Job Safety Subskala der Work Safety Scale nach Hayes, Perander, Smecko und Trask (1998) (4 Items).

Die Durchgänge unterschieden sich entsprechend der unabhängigen Variablen in der Gangbreite und in der Arbeitsgedächtnisbelastung. Für die Gangbreite wurde in 3 Stufen manipuliert mit 1) einem breiten Gang (1,90m) ohne versperrtem Rücken, 2) einem engen Gang (1,10m) ohne versperrtem Rücken, und 3) einem engen Gang (1,10m), bei dem zusätzlich der Rücken und damit der Fluchtweg nach hinten durch eine Montagevorrichtung (Höhe: 2,14m) versperrt wurde. Die Gangweiten sind in Abbildung 79 zu sehen.



Abbildung 79: Manipulation der Gangweite in drei Stufen mit zunehmender Einengung von links nach rechts

Zur Manipulation der Arbeitsgedächtnisbelastung in zwei Stufen diente die kognitive Nebenaufgabe, laut in dreier-Schritten rückwärts zu zählen. Als Coverstory wurde den Versuchspersonen in diesem Studienabschnitt erklärt, dass sich der Roboter dabei völlig autonom verhielt. Tatsächlich aber wurde der Roboter aus Gründen der Sicherheit und experimentellen Kontrolle nach der sogenannten Wizard-Of-Oz Methode vor der Versuchsperson verdeckt von einem Operateur ferngesteuert und verhielt sich somit nicht autonom. Im dritten Studienabschnitt wurde die Versuchsperson gebeten noch weitere Fragebögen auszufüllen, die jedoch im Berichtszeitraum nicht weiter untersucht wurden. Zum Schluss wurden die Versuchspersonen über die Cover Story aufgeklärt und eine Teilnahmevergütung in monetären Einheiten (15€) ausgezahlt.

Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt wurde über alle Versuchspersonen und über alle Versuchsbedingungen hinweg eine mittlere Wohlfühldistanz von $M = 51,62$ cm mit einer sehr breiten Streuung von $SD = 34,44$ gemessen. Die Abstände gegenüber dem Roboter scheinen sich also stark zwischen Personen und/oder den jeweiligen situativen Bedingungen zu unterscheiden.

Für die Analyse der Hypothesen wurden entsprechend nach MacKinnon, Fairchild und Fritz (2007) Mediationsanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse der Mediationsanalyse wurden zur Publikation von Benedikt Leichtmann, Albrecht Lottermoser, Julia Berg, und Verena Nitsch bei einem psychologischen Fachjournal eingereicht und befinden sich derzeit noch im Peer-Review Prozess. Details der Ergebnisse können daher an dieser Stelle noch nicht berichtet werden. Die Ergebnisse sind an dieser Stelle daher nur kurz und oberflächlich berichtet. Das Modell zum Einfluss von Gangbreite auf die Wohlfühldistanz zeigte keinen statistisch signifikanten Einfluss d.h. zwischen keinen der Bedingungen weiter Gang ($M = 50,56$ cm; $SD = 33,12$ cm), enger Gang ($M = 52,25$ cm; $SD = 34,89$ cm) und enger Gang mit versperrem Rücken ($M = 52,05$ cm; $SD = 35,47$ cm) ergab sich ein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$). Die indirekten Effekte über wahrgenommenem Stress und wahrgenommener Kontrollierbarkeit zeigten jedoch signifikante Ergebnisse. So stieg Stress bei engerem Raum an, während Kontrollierbarkeit abnahm. Bei höherem Stress und geringerer Kontrollierbarkeit wiederum präferierten die Versuchspersonen größere Abstände gegenüber dem Roboter. Ähnliche Effekte zeigten sich auch bei der Wirkung von Arbeitsgedächtnisbelastung. Zusätzlich wurde auch untersucht inwieweit sich der Wohlfühlabstand mit zunehmender Interaktionsdauer veränderte. In der Studie nahm der Wohlfühlabstand mit jedem weiteren Durchlauf im

Schnitt ab. Je länger die Versuchspersonen also mit dem Roboter interagierten, desto näher konnte der Roboter an sie heranfahren.

Die aufgestellten Hypothesen wurden teilweise bestätigt. Zwar konnte kein direkter Einfluss der Raumenge oder der Arbeitsgedächtnisbelastung auf die Wohlfühldistanz der Versuchspersonen festgestellt werden, jedoch zeigten die Ergebnisse, dass sich die Raumenge und die Arbeitsgedächtnisbelastung auf die Kontrollwahrnehmung und das Stressempfinden der Personen auswirkten. Bei engerem Raum oder erhöhter Arbeitsgedächtnisbelastung nahm das Kontrollempfinden ab und das Stressempfinden stieg an. Gesteigerter Stress und geringeres Kontrollempfinden führten im Schnitt zu größerer Wohlfühldistanz. Verschiedene Gründe könnten in dieser Studie dazu geführt haben, dass sich dieser indirekte Effekt nicht als direkter Effekt in einem signifikanten Unterschied der unabhängigen Variablen widerspiegelte. Der wahre Effekt von Umweltfaktoren könnte kleiner sein als zunächst angenommen und demnach wäre die Power in dieser Studie zu gering. Störvariablen der Laborsituation wie die sehr hohen Sicherheitsvorkehrungen oder die mangelnde Interaktivität des Roboters könnten dazu geführt haben, dass die Situation allgemein nicht als kritisch genug eingeschätzt wurde und somit eine größere Wohlfühldistanz als Kompensationsstrategie nicht evoziert wurde. Neben einer größeren Wohlfühldistanz könnten aber auch andere Kompensationsstrategien genutzt worden sein, um den Zustand erhöhten Stresses situativ zu senken (z.B. kurzzeitige Aufmerksamkeitsverlagerung). Entsprechend vorheriger Forschung zum Einfluss von Erfahrung mit dem Roboter auf die Wohlfühldistanz, wurde auch in dieser Studie festgestellt: Je häufiger die Versuchspersonen mit dem Roboter interagierten, desto geringer wurde der Wohlfühlabstand.

Für die praktische Anwendung bedeutet dies insgesamt, dass enge Gänge und ein erhöhtes Arbeitspensum zwar nicht zwingend dazu führen, dass Personen einen größeren Wohlfühlabstand benötigen. Jedoch sollte bedacht werden, dass sich real-weltliche Umgebungen von der Laborsituation unterscheiden: So könnten z.B. fest installierte Regale mit teils schweren Montageteilen unterschiedlicher Größe und Form einen deutlich gefährlicheren Eindruck machen. Unter Annahme des Modells interner Zustände, könnte dann bei so gesteigertem Stresslevel, sich dieses auch in tatsächlichem Verhalten deutlicher niederschlagen.

Arbeitspaket 5.2.3: Evidenzbasierte Empfehlungen für nutzeroptimales Roboterverhalten

Aufbauend auf theoretischen Überlegungen, den Ergebnissen des systematischen Literatur-Reviews inklusive meta-analytischer Betrachtungen, sowie dem Laborexperiment zum Einfluss von Raumenge und Arbeitsgedächtnisbelastung wurden konkrete Gestaltungsempfehlungen für den Forschungsverbund erarbeitet.

Insgesamt zeigt die Meta-Analyse, dass ein Roboter im Schnitt 81,61 cm Wohlfühlabstand halten sollte. Jedoch ist dies variabel über Situationen und Personen hinweg, wie die Streuung zeigte. Die Laborstudie (5.2.2.) ergab, dass hierbei durchaus auch geringere Distanzen vorstellbar sind. So war hier die durchschnittlich gewünschte Distanz 51,62 cm. Jedoch sollte wiederum die weite Streuung von 34,44 cm berücksichtigt werden. Als insgesamt vielversprechendster Einfluss kann die Erfahrung mit Robotersystemen gezählt werden. Dies bedeutet, dass vor der Einführung 1) Trainings und Anlerneinheiten mit der Technologie ermöglicht werden sollten und 2) für eine Testphase anfangs ein weiterer Abstand eingestellt werden sollte, der im Laufe der Zeit bei Bedarf reduziert werden kann. Theoretische Überlegungen legen nahe, dass individuelle Einflussfaktoren wie Gender, Alter oder Persönlichkeit zu vernachlässigen sind. Empirische Studien zeigen ein gemischtes Bild mit schwieriger theoretischer als auch empirischer Grundlage. Vielversprechendere

Ansätze liefern jedoch die Identifikation der Haltung der anzunähernden Person: So sollte die Roboterplattform größeren Abstand halten: 1) Wenn die Werkskraft mit dem Rücken oder in nicht-stehender Position zum Roboter befindet, 2) in Situationen mit vielen Hindernissen oder bei beengten Raumverhältnissen, 3) beim Einfluss weiterer Stressoren wie Lärm oder Hitze die zusätzlich zur Überlastung führen können. Dies konnte zwar in Studien noch nicht einheitlich nachgewiesen werden, jedoch zeigen Befunde erste Tendenzen in diese Richtung. Auch sollte in Annäherungssituationen mit besonderer Kritikalität zur Überlastung (enger Raum, viel Lärm u.Ä.) berücksichtigt werden, dass nicht noch weitere Stressoren von Seiten des Roboters (z.B. unnötige Bewegung des Manipulators) zu einer möglichen Überlastung beitragen. Die Empfehlungen wurden in diesem Zuge TP 2 zur Berücksichtigung bei der Gestaltung der lokalen Bahnplanung zur Verfügung gestellt.

Arbeitspaket 5.3: Menschengerechte Aufgabenallokation

Das AP 5.3 befasst sich mit der Aufgabenallokation zwischen Mensch und Roboter in der geplanten Teamarbeit des gewählten Use Cases. Voraussetzung für eine menschengerechte Aufgabenallokation ist zunächst die genaue Untersuchung der Arbeitsaufgabe. Hierfür wurde vor allem im zweiten Förderjahr eine Feldstudie als teilnehmende Beobachtung durchgeführt. Die teilnehmende Beobachtung erfolgte bei der Krones AG im Werk Nittenau und fokussierte die für den Use Case identifizierte Teamaufgabe (Montage eines Behältertisches). So wurde beispielsweise festgestellt, dass die Aufgabe des Schrauben-Festdrehens bei der Motormontage am schnellsten aufgrund von Monotonie zu Ermüdungserscheinungen der Werkkraft führt und daher vom Roboter übernommen werden sollte, während der Mensch vorbereitende oder nachbereitende Arbeiten wie beispielsweise Positionieren der Schrauben oder Einfetten übernehmen kann.

Arbeitspaket 5.4: Nutzerzentriertes Mensch-Roboter-Interface Design

In Kooperation mit TP 4 wurde ein Interaktionskonzept ausgearbeitet, das verschiedene Interaktionstechnologien beinhaltet. In AP 5.4.1. sollten dafür empirische Untersuchungen und Analysen die Technikentwicklung formativ unterstützen. Dieses Konzept sollte dann in einem zweiten Schritt in AP 5.4.2. auf die Mensch-Multiroboter Interaktion ausgeweitet werden.

Arbeitspaket 5.4.1: User Interface Design für die Mensch-Roboter-Kooperation

Für eine effektive und flexible Mensch-Maschine Interaktion, wurden verschiedene Kommunikationskanäle genutzt. Für die Gestensteuerung des Roboters wurde dazu zunächst im ersten Förderjahr eine Laborstudie zur Identifikation von intuitiven Gesten durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Studie wurden zur Implementierung an TP 4 zurückgespiegelt. Im zweiten Förderjahr folgten darauf aufbauend schließlich eine Laborstudie zur Erlernbarkeit und Ausführbarkeit der identifizierten Gesten, sowie die Untersuchung objektbezogener Gesten. Als weiteres Interface Element dient die Projektion des Fahrtweges auf den Boden zur Verbesserung des Situationsverstehens. Hierfür wurde ebenfalls im zweiten Förderjahr eine Studie zum Verständnis dieser Information in Interaktion mit Warnsignalen speziell für Kreuzungssituationen durchgeführt. Zum schnellen und einfachen Programmieren des Roboters für Werkkräfte ohne Programmierkenntnisse, soll ein Playback Verfahren genutzt werden. Ein hierzu im Rahmen von TP 4 entwickeltes Interface wurde im dritten Projektjahr durch die Krones AG in einer Usability Studie evaluiert. Weitere Elemente

des Interface wie die Sprachsteuerung oder das graphische Tabletinterface wurden im Förderzeitraum noch nicht empirisch evaluiert. Hierbei unterstützte TP 5 hauptsächlich beratend und durch analytische Vorarbeiten (Goal-Directed Task-Analysis).

Laborstudien zur intuitiven Gestensteuerung

Gerade in Produktionsumgebungen müssen Befehle oft kurz und schnell gegeben werden. Hier bietet sich teilweise Gestensteuerung an, um einem Robotersystem ebensolche kurzen, einfachen Befehle zu signalisieren. Dabei sollen Gesten möglichst intuitiv sein, um Fehler beispielsweise beim Erinnern zu vermeiden. Als intuitive Gesten können Gesten definiert werden, die einfach abrufbar und erinnerbar, sowie leicht erlernbar und ausführbar sind (Köpsel & Huckauf 2013). Daher sollte in einer ersten Studie im ersten Förderjahr für 5 Befehle intuitive Gesten identifiziert werden:

- 1) Ein Stopp-Befehl, der das Anhalten des Roboters signalisiert,
- 2) ein „Komm her“-Befehl, der das Näherkommen des Roboters signalisieren soll,
- 3) ein Richtungsbeehl, bei dem eine Richtung angezeigt wird, in die der Roboter fahren soll,
- 4) ein objektbezogener Befehl, bei dem angezeigt werden soll, mit welchem Objekt der Roboter interagieren soll, und
- 5) ein „Weitermachen“-Befehl, der dem Roboter anzeigen soll mit einer initiierten Aufgabe fortzufahren.

Zur Untersuchung ebendieser wurde ein gemischtes experimentelles Design gewählt. Dabei wurde die Arbeitsgedächtnisbelastung als Zwischensubjekt-Faktor in 2 Stufen (mit und ohne kognitiver Nebenaufgabe), die Handverfügbarkeit als Innersubjekt-Faktor in 3 Stufen (beide Hände frei, eine Hand frei, keine Hand frei / Kiste tragend) und als weiterer Innersubjekt-Faktor die semantische Bedeutung des Befehls in 5 Stufen (Befehle siehe oben) variiert. Im Versuch sollte schließlich einem Youbot der Firma Kuka in einem fiktiven Szenario entsprechende Befehle über Gesten mitgeteilt werden. Insgesamt nahmen $N = 64$ Personen am Versuch teil. Für die gezeigten Gesten wurde herausgefunden, dass Befehle vor allem mit einer Hand ausgeführt wurden. Des Weiteren wurden die Gesten für Stopp und zur Richtungsanzeige über die Versuchspersonen hinweg am gleichförmigsten ausgeführt. Dabei wurde vor allem auch die Stopp-Geste im Vergleich zu allen anderen signifikant schneller ausgeführt. Beim Tragen einer Kiste oder für den Weitermachen-Befehl wurden weniger sinnvolle Gesten identifiziert. Diese Studie deckte lediglich die Aspekte der Abrufbarkeit, sowie der Ausführbarkeit von Gesten ab. Die Erlernbarkeit und Erinnerbarkeit wurde nicht getestet. Des Weiteren blieben Fragen zu objektbezogenen Gesten offen – beispielsweise ob sich hier Gesten nach Objektart und Position der Objekte unterscheiden.

Aus diesem Grund wurde im zweiten Förderjahr eine Anschluss-Studie mit einer Versuchspersonenzahl von $N = 43$ zu diesen offenen Punkten durchgeführt. Zum einen wurden die Erinnerungsleistung der oben genannten Gestenbefehle (außer für den „Weitermachen“-Befehl) nach einer Lernphase mit anschließender Pause gemessen. Zum anderen wurden objektbezogene Gesten genauer untersucht. In der vorangehenden Studie wurde nur ein Objekt (rote Kugel) an einem fixierten Platz im Raum untersucht, mit dem der Roboter nach Befehlsgabe interagieren sollte. Über ein 2x2 Within-Subject Design wurde daraufhin getestet, ob sich objektbezogene Gesten unterscheiden 1) für unterschiedliche Objekte (Hammer und Schütte) und 2) wenn diese Objekte unterschiedlich verteilt waren (weit verteilt, eng beieinanderliegend). Die Auswertung ist zum Berichtszeitpunkt noch nicht abgeschlossen.

Laborstudie zur Projektion des Fahrtweges und auditive Signale in Kreuzungssituationen

Ein zentraler Aspekt nutzerfreundlicher Interface-Gestaltung ist es, das Situationsverstehen der Nutzenden zu verbessern. Im Use Case wurden in diesem Zusammenhang Interaktions-Situationen an Wegkreuzungen (z.B. beim Kommissionieren von Produktionsteilen in Lagerumgebungen) als besondere Herausforderung für das Situationsverstehen menschlicher Nutzer*innen identifiziert, da in diesen Situationen Interaktionen 1) oft unerwartet auftreten können, 2) einen Zielkonflikt beinhalten können (Wegkreuzung), und 3) oft hinsichtlich einiger Informationskanäle durch Regalverdeckungen eingeschränkt sein können. Eine Möglichkeit Intentionen der Roboterbewegung in solchen Situationen transparenter zu gestalten, ist über Augmented Reality Anzeigen, mit denen der geplante Fahrweg des Roboters auf den Boden projiziert wird. Bunz et al. (2016) zeigen, dass solche Projektionen des Fahrtweges das Situationsverstehen von Nutzer*innen verbessern können, die Anzeige jedoch nicht von allen Versuchspersonen gesehen wurde. Im zweiten Projektjahr wurde eine Studie konzipiert, in der untersucht wurde, wie die Aufmerksamkeit erhöht werden kann. In einem 2x2 Within-Subject-Design mit $N = 43$ wurde der Effekt 1) durch Aufblinken der Projektion (2 Stufen: Statische Projektion des Pfeils, aufblinkende Projektion des Pfeils) und 2) durch einen Signalton (2 Stufen: Mit Warnton, ohne Warnton) untersucht. Die Sicherheit der Entscheidung, die Kreuzung zu überqueren, das Vertrauen in das System, oder ob die Projektion oder der Warnton wahrgenommen wurden, wurde über Selbstauskunft gemessen. Im Experiment erhielten die Versuchspersonen in 4 Durchläufen die Aufgabe bestimmte Gegenstände auf einer Liste einzusammeln (einer Kommissionier Aufgabe nachempfunden). Da sich die Materialien am Ende eines kurzen Ganges befanden, musste dafür eine Wegstrecke zurückgelegt werden, auf der sich eine Kreuzung mit einem anderen Gang befand. Sobald sich die Versuchsperson der Kreuzung näherte, fuhr die Roboterplattform des Forschungsverbundes aus dem kreuzenden Gang ebenfalls auf die Kreuzung zu. Je nach Durchgang wurde dabei der Fahrweg der Plattform statisch oder blinkend als Projektion auf den Boden angezeigt, und mit oder ohne Signalton präsentiert. Nach jeder Kreuzungssituation wurden die Versuchspersonen zu ebendieser Situation interviewt und die abhängigen Variablen gemessen.

Die statistische Auswertung ergab, dass im Interview nach jeder Kreuzungssituation, bei der die Versuchspersonen die Situation nochmal beschreiben sollten, der Ton signifikant häufiger genannt wurde, wenn dieser auch vorhanden war ($\chi^2(1) = 9,79, p < .01$), das Blinken der Projektion jedoch nicht dazu führte, dass die Projektion häufiger genannt wurde ($\chi^2(1) = 1,95, p = .16$). Dies deutet daraufhin, dass das Blinken der Projektion nicht dazu führte, die Aufmerksamkeit der Nutzer*innen auf die situations-relevante Information zu erhöhen. Des Weiteren hatte der Signalton zwar statistisch signifikanten Einfluss darauf, wie sicher sich die Versuchspersonen waren, den Gang überqueren zu können ($p < .05; \beta = .24$), dieser Einfluss ist jedoch aus praktischer Sicht zu vernachlässigen. Weder Unterschiede in der Projektion, noch der Warnton hatten jedoch Einfluss auf das Vertrauen in das System allgemein. Im Gegensatz dazu war der Effekt der Anzahl an Durchläufen sowohl für die Sicherheit der Entscheidung den Gang zu kreuzen ($p < .001; \beta = .30$), als auch in das Vertrauen in das System ($p < .001; \beta = 1.55$) signifikant. Die Ergebnisse deuten daher daraufhin, dass sich die Aufmerksamkeit auf die Projektion nicht mittels Aufblinken dieser verbessern ließen. Der Signalton hatte zwar einen positiven Effekt, jedoch praktisch vernachlässigbar. Wie in anderen Ergebnissen (z.B. AP 5.2.2.) zeigte sich auch hier, dass die Anzahl an Durchgängen sich signifikant auf Vertrauen in das System und dessen Umgang auswirkten.

Evaluation eines Interface zur nutzer-zentrierten Playback Programmierung

Für die Mockups des User-Interfaces des Playback Programmiersystems aus Teilprojekt 4 wurden im dritten Förderjahr zwei kurze Evaluierungen durchgeführt. Die erste Evaluierung fand über eine Expertenbeurteilung mit einem Papier Prototyp statt. Als zweite Evaluationsstudie wurde die Usability über interaktive virtuelle Mockups mit Nicht-Experten aus der Montage getestet. Für die expertenbasierte Evaluierung des Papier Prototyps wurde ein Cognitive Walkthrough in Kombination mit einer Heuristischen Evaluierung nach Nielsen (1994) durchgeführt, um mit Hilfe von Usability-Experten mögliche Verbesserungsaspekte zu identifizieren. Dabei wurde angemerkt, dass das Interface nicht gänzlich konsistent war und das Vokabular (z.B. „Capture Stimulus“) noch mehr an die Zielgruppe angepasst werden müsse. Darauf aufbauend wurde ein interaktives virtuelles Mockup entworfen und eine Anwenderstudie mit 20 Werkkräften aus dem Montagebereich als Domäne-Experten bei der Firma Krones durchgeführt. Zu Beginn der Evaluation wurden die Personen über ein Video zur Nutzung des Systems instruiert und mussten anschließend selbst Aufgaben mit Hilfe des interaktiven, virtuellen Mockups und einem skalierten, nicht automatisierten Robotermodell durchführen (z.B. Pick-and-Place-Aufgabe mit nachträglichem Editieren oder Sortieraufgabe). Für die Evaluierung des interaktiven virtuellen Mockups wurde das MINERIC-Toolkit verwendet (Orendt, Fichtner & Henrich 2017). Die Gesamtbewertung (auf einer Skala von 0 bis 220) von $M = 39,2$ ($SD = 23,5$) bedeutet einen *geringen Aufwand* für die Nutzung der Schnittstelle. Den Versuchspersonen fiel es leicht, die entworfene Benutzungsschnittstelle zu verwenden. Die Zufriedenheit gemessen über einen Gesamtscore von $M = 3,7$ ($SD = 0,8$) auf einer Skala von 1 (nicht zufrieden) bis 5 (voll zufrieden) zeigt, dass die Teilnehmenden insgesamt eher zufrieden waren. Insgesamt zeigte die Untersuchung, dass mit Hilfe des Designprozesses die Schnittstelle für das Wiedergabe-Programmiersystem verbessert wurde und auch von Nicht-Experten verwendet werden kann.

Unterstützung bei Konzeption eines Tabletinterfaces: Goal-Directed Task Analysis

Für das User Interface Design, das die Werksperson bei der Montagetätigkeit unterstützt, wurden Informationen erarbeitet, die für den Informationsaustausch zwischen Werksperson und Roboter erforderlich sind. Dazu wurde die Methode *Goal Directed Task Analysis (GDTA)* nach Endsley, Bolté und Jones (2003) benutzt. Diese basierte auf Leitfaden-Interviews mit Werkspersonen der Montageabteilung ($N=4$). Alle interviewten Personen führten in ihrem Beruf die Arbeitsaufgabe aus, die im Arbeitssystem analysiert wurde. Im Gespräch wurden die übergeordneten Ziel der Werkspersonen bei dieser Aufgabe, einzelne Teilziele und die entsprechenden Entscheidungen zum Erreichen der Ziele identifiziert. Zudem wurden die Informationen herausgefiltert, die die Werkkräfte benötigen, um die entsprechenden Entscheidungen fällen zu können. Die Inhalte der Interviews wurden in einer Zielhierarchie dargestellt. Die erforderlichen Entscheidungen, um jedes Ziel in der Zielhierarchie effektiv zu erreichen, sind unterhalb der zugeordneten Ziele angeordnet. Entscheidungen werden in Form von Fragen gestellt. Die nachfolgenden Anforderungen für das Situationsbewusstsein liefern die Informationen, die zur Beantwortung der Fragen benötigt werden. Die Zielhierarchie ist in Abbildung 80 dargestellt. Die Ergebnisse der GDTA können dazu genutzt werden, um begründete Design-Entscheidungen zu treffen. So sollten Informationen, die häufiger für wichtige Entscheidungen benötigt werden, zentraler verfügbar gemacht werden, als andere Informationen, die nur selten benötigt werden. Informationen, die nicht für Entscheidungen benötigt werden, sollten nicht auf dem Bildschirm präsentiert werden – oder nur auf Anfrage der Werkkraft – um Informations-Überladung zu vermeiden.

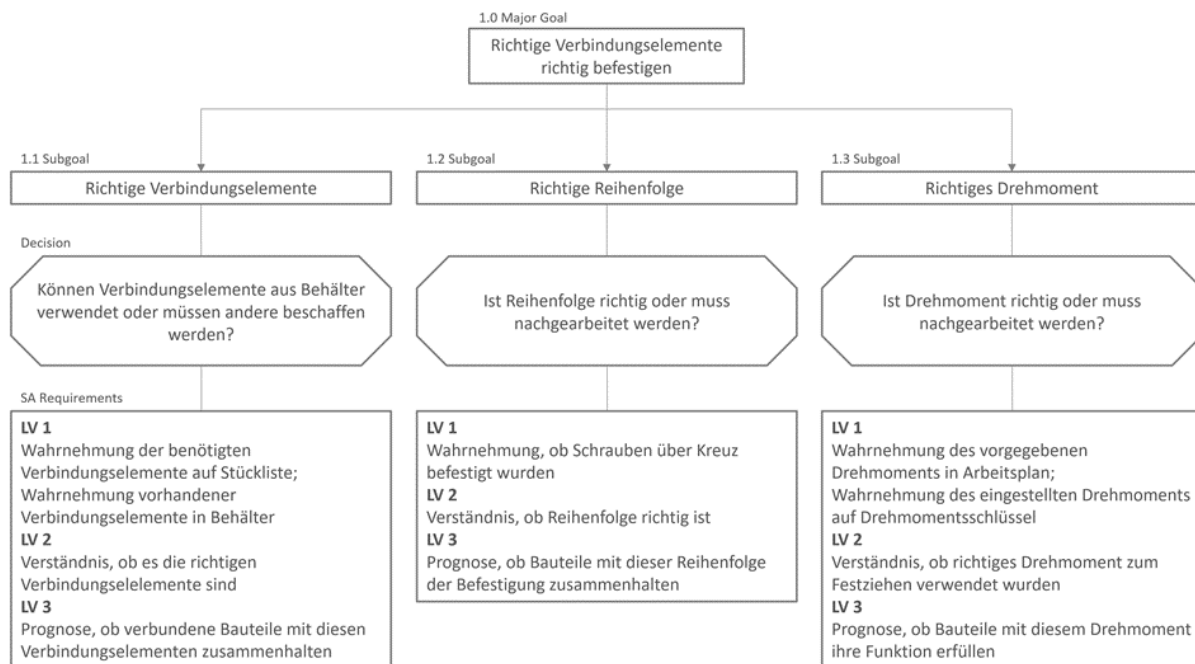


Abbildung 80: Zielhierarchie als Ergebnis der GDTA, eingeteilt in übergeordnetes Ziel, Teilziele, Entscheidungen und Anforderungen an das Situationsbewusstsein (von oben nach unten).

Arbeitspaket 5.4.2: User Interface Design für die Mensch-Multiroboter-Kooperation

Ein Arbeitssystem mit mehreren Robotern und mehreren Werkkräften stellt aufgrund der Dynamik ein äußerst komplexes Szenario dar, das aufgrund der begrenzten kognitiven Kapazitäten menschliche Nutzer*innen vor eine Herausforderung stellen wird. Aufgrund der hohen Komplexität der Implementierung allein eines Robotersystems und des damit verbundenen erhöhten Ressourcenbedarfs, konnte in der Förderperiode der Fall multipler Roboter im Zusammenarbeit mit Nutzer*innen nicht empirisch-evaluativ betrachtet werden.

Arbeitspaket 5.5: Summative Evaluation & Risikobeurteilung

Die Evaluation der Mensch-Technik Interaktion im Kontext von Arbeitssystemen vor der Implementierung beinhaltet einige Herausforderungen, die möglichst umfassende und komplexe Evaluations-Designs verlangen. Im Laufe des zweiten Förderjahres wurde daraufhin ein Mixed-Method Multi-Level Triangulation Design konzipiert, um die Ganzheitlichkeit des soziotechnischen Systems und dessen Komplexität berücksichtigen zu können. Bei einem Mixed-Method Ansatz werden qualitative und quantitative Methoden kombiniert, um dadurch sowohl ein breites, als auch tiefes Verständnis zu ermöglichen (Johnson, Onwuegbuzie & Turner 2007). Bei der Triangulation werden schließlich beide Ansätze zu einem Gesamtbild zusammengefügt. Dabei werden die Ansätze als gleichbedeutend erachtet (Creswell 2006). Um auch verschiedene Level des Systems, das neben dem unmittelbaren Interaktionskontext auch Einflüsse auf organisationaler Ebene beinhaltet wie die Unternehmenskultur oder Werker-Management-Beziehungen, wurde diese Mehrdimensionalität bewusst über eine Multi-Level Betrachtung mit in das Evaluationskonzept einbezogen. Diese Level umfassen in diesem Konzept 1) die Arbeitsaufgabe, 2) die Prozessebene als Ketten der einzelnen Arbeitsaufgaben und 3) das Arbeitssystem als Ganzes, indem auch orga-

nisationale Konstrukte wie die Arbeitskultur Berücksichtigung finden. Als Indikatoren für die Evaluation werden die in der Norm DIN EN ISO 6385:2016 genannten Kriterien (Gesundheit und Wohlbefinden, Sicherheit, Gebrauchstauglichkeit, Systemleistung und Kosten-Nutzen-Relation) herangezogen (DIN EN ISO 6385:2016).

Das Evaluationskonzept inklusive der entsprechenden Studien und Analysen ist in Tabelle 11 dargestellt. Als Ausgangslage des Konzepts dient die in AP 5.1. durchgeführte Arbeitssystemanalyse (siehe AP 5.1.). Weitere Studien auf höherer Systemebene erfolgten im zweiten Jahr durch die Einstellungsmessung in Form einer Mitarbeiterbefragung (AP 5.5.3.), welche auch Einflüsse von Kultur und zwischenmenschlichen Beziehungen miteinbezogen, sowie im dritten Jahr ein Workshop zur Analyse von ethischen, legalen, und sozialen Risiken in Folge der Implementierung von mobilen Robotersystemen (AP 5.5.2., siehe AMICAI Workshop). Sowohl eine Tagebuchstudie als begleitende Maßnahme der Feldphase im dritten Förderjahr (AP 5.5.1.), als auch eine Risikoanalyse des Use Cases des Forschungsverbunds (AP 5.5.2., siehe arbeitswissenschaftliche Risikoanalyse) beziehen die Prozessebene als Verknüpfung von Arbeitsaufgaben mit ein. Beide Analysen lassen aber auch Schlüsse auf Ebene einzelner Arbeitsaufgaben zu. Vor allem durch die Laborexperimente 1) zur Wirksamkeit von Interfacelösungen in Form von Augmented Reality und Warntönen in Kreuzungssituation einerseits (AP 5.4.1.), als auch 2) zur Wirkung von Gangbreiten und mentaler Beanspruchung auf die Wohlfühl- und Distanz (AP 5.5.2.) andererseits, dienen nicht nur als formative Evaluationsstudien zur Einbeziehung in den Entwicklungsprozess, sondern können auch zur Gesamtbeurteilung des Use Cases genutzt werden. Beide Analysen beziehen sich dabei vorrangig auf die Kommissionier-Arbeit in Lagerumgebungen des Use Cases. Der Fall der kooperativen Montage konnte in der Förderperiode nicht empirisch untersucht werden. Eine Interviewstudie nach einer ersten Testphase der Roboterplattform in Anwenderunternehmen, soll dazu dienen Informationen auf allen drei Ebenen zu gewinnen (AP 5.5.1.)

Tabelle 7: Überblick der Einzelarbeiten, die für die summative Evaluation herangezogen wurden. Zum Berichtszeitpunkt noch ausstehende Analysen sind mit grün markiert.

| Analyse-Ebene | Analyse | Methode | Klassifikation der Methode | Abschluss |
|---------------------------------|---|--|----------------------------|-----------|
| Arbeitssystem | Arbeitssystemanalyse | Leitfadengestützte Beobachtungs-Interviews | Empirisch, Qualitativ | Aug 17 |
| Arbeitssystem | Einstellungsmessung von Werkräften | Fragebogenstudie | Empirisch, Quantitativ | Mrz 19 |
| Arbeitssystem | Workshop zur Identifikation von Risiken bezüglich ELSI-Aspekten | Fokusgruppenstudie | Empirisch, Qualitativ | Jan 20 |
| Arbeitsprozess & Arbeitsaufgabe | Arbeitswissenschaftliche Risikoanalyse | Expertenbeurteilung | Analytisch | Feb 20 |
| Arbeitsprozess & Arbeitsaufgabe | Evaluation der Feldphase - 1 | Tagebuchstudie | Empirisch, Qualitativ | Mrz 20 |
| Arbeitsaufgabe | Augmented Reality Anzeige und Warntöne in Kreuzungssituationen | Laborstudie | Empirisch, Quantitativ | Jan 19 |
| Arbeitsaufgabe | Wirkung der Raumenge und Workload auf Wohlfühl- und Abstand | Laborstudie | Empirisch, Quantitativ | Okt 19 |
| Alle Ebenen | Evaluation der Feldphase - 2 | Interviewstudie | Empirisch, Qualitativ | Mrz 20 |

Arbeitspaket 5.5.1: Leistungsanalyse und Bedienkomfort

Dieses Arbeitspaket bezieht sich vorrangig auf die Evaluationskriterien der Systemleistung und der Gebrauchstauglichkeit (DIN EN ISO 6385:2016). Bereits formative Evaluationsstudien aus Arbeitspaketen AP 5.4.1. zur Untersuchung der Interfacegestaltung, sowie AP 5.2.2. zur Untersuchung von Roboterbewegung, können erste Hinweise auf die Bewertung der Plattform hinsichtlich Bedienkomfort liefern. So konnte in beiden Studien festgestellt werden, dass das Vertrauen in das System mit zunehmender Anzahl an Durchgängen signifikant anstieg. Dies spricht dafür, dass Erfahrung, wenn auch nur durch wenige kurze Interaktionen, stark zum sichereren Umgang mit der Technologie beiträgt. Zudem zeigte sich, dass auch einzelne Interface-Bestandteile (z.B. Warnsignale, AP 5.4.1.), sowie nutzerfreundliche Abstände (AP 5.2.2.) maßgeblich zum Bedienkomfort beitragen können, wenn auch nicht in dem zuvor angenommenen Maße. Zwar können derartige Laborstudien erste Hinweise zur Gestaltung der Interaktion liefern, jedoch muss in jedem Fall eine ganzheitliche Untersuchung von Interaktion-Szenarien erfolgen. Während Laborstudien zu bestimmten Fragestellungen nur einzelne Aspekte in sehr spezifischen Kontexten (z.B. bestimmtes Kreuzungsszenario) berücksichtigen können, erlauben Felduntersuchungen ganzheitliche Betrachtungsweisen. So können auch Interaktionseffekte, sowie moderierende Faktoren besser ausgemacht werden. Beispielsweise zeigte der auditive Warnton im Laborexperiment einen signifikanten Effekt, jedoch könnte dieser in anderen Kontexten durch andere auditive Signale (z.B. anderer Werkzeugmaschinen) überdeckt werden, oder in Kontexten mit vielen Reizen auch zu einer Reizüberlastung führen. Auch die Ergebnisse der Untersuchung des Wohlfühlabstandes in Abhängigkeit der Gangbreite könnten in der Gesamtheit des Use Cases anders ausfallen (siehe AP 5.2.2.). Zur holistischen Betrachtung des Use Cases wurden daher für erste Feldphasen der Roboterplattform bei den Anwenderunternehmen des Forschungsverbundes am Ende des dritten Förderjahres zwei begleitende Evaluationen konzipiert: Eine Tagebuchstudie während und eine Interviewstudie nach der Feldphase.

Zur „längsschnittlichen“ Evaluation des Robotersystems wurde ein Tagebuch entwickelt, das für die Dauer der Feldphase täglich von einer dafür beauftragten Person ausgefüllt werden soll. In diesem Tagebuch sollen der Energieverbrauch, Vorkommnisse wie Unfälle, Beinahe-Unfälle oder Auftragsfehler, der Anteil erfolgreich erledigter Aufträge, sowie die subjektive Einschätzung bezüglich festgelegter Kriterien wie Nutzerfreundlichkeit oder Akzeptanz im Kollegium erfasst werden. Zum Berichtszeitpunkt wurde die Feldphase und daher die Tagebuchstudie noch nicht abgeschlossen. Zusätzlich zur Tagebuchstudie wurde eine Interviewstudie konzipiert. Hierbei sollen nach einer ersten Feldphase pro Arbeitssystem 3-4 Werkskräfte zu den ersten Testläufen in den realen Arbeitssystemen der Anwender befragt werden, und etwaige zukünftige Entwicklungen abgeschätzt werden. Dabei soll im Gespräch der erste Eindruck der Werkskräfte erfasst, der Ablauf der Feldphase kritisch hinsichtlich Chancen sowie Probleme im Zusammenhang mit dem Roboter reflektiert, und mögliche Veränderungen hinsichtlich der Arbeitsaufgabe sowie des Teamgefüges abgeschätzt werden. Zudem sollen die Ansichten der Werkskräfte hinsichtlich notwendiger Veränderungen am Arbeitsplatz als auch der Kompetenzentwicklung für eine erfolgreiche Einführung erfasst werden. Zum Interviewabschluss sind Fragen zur Wert- und Zielentwicklung der Werkskräfte hinsichtlich der zukünftigen Technikentwicklung geplant.

Arbeitspaket 5.5.2: Risikoanalyse

Bei der Analyse möglicher Risiken, die sich aus der Implementierung der Roboterplattform ergeben könnten, sollen nicht nur aus arbeitswissenschaftlicher Perspektive unmittelbare Gefährdungen

für die menschliche Gesundheit (Kriterium der Sicherheit) identifiziert werden, sondern auch Risiken auf ethischer, gesetzlicher (legaler) und sozialer Ebene betrachtet werden (sogenannte ELSI-Aspekte). Dazu wurden in Arbeitspaket 5.5.2. zwei Untersuchungen durchgeführt.

Arbeitswissenschaftliche Risikoanalyse

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde eine Evaluation der Gefährdungen des auf einer fahrbaren Plattform montierten kooperativen Roboters gemäß den geltenden Bestimmungen der Arbeitssicherheit durchgeführt. Aufgrund des Entwicklungsstandes des kooperativen Roboters wurde die Vorgehensweise der prospektiven objektorientierten Gefährdungsermittlung durch Experten gewählt. Die objektorientierte Gefährdungsermittlung trägt zu einer Ermittlung von Gefährdungen bei, welche im Zusammenhang mit dem kooperativen Roboter auftreten können. Die einzelnen Subsysteme des Roboters, der Manipulator sowie die fahrbare Plattform fallen unter den Geltungsbereich der EG-Maschinenrichtlinie und sind aufgrund der Verfügbarkeit auf dem europäischen Markt sowohl mit einer EG-Konformitätserklärung als auch mit einem CE-Kennzeichen ausgestattet. Es ist daher die Einhaltung der geltenden Sicherheitsvorschriften nach EN ISO 10218 1 und EN ISO 10218 2 für die einzelnen Subsysteme vorauszusetzen (ISO 10218-1:2011; ISO 10218-2:2011). Aus diesem Grunde wurde im Rahmen der objektorientierten Gefährdungsermittlung auch auf die Ermittlung von Gefährdungen fokussiert, welche aufgrund des kombinierten Betriebs der genannten Subsysteme in einem System entstehen.

Die objektorientierte Gefährdungsermittlung gründet auf der Begehung des Gefahrenbereichs unter Beteiligung der folgenden Personen bzw. Personengruppen: Sicherheitsexperte, Entwicklungsteam und Evaluationsteam. Im Rahmen der Begehung wurden zunächst die Grenzen des Systems sowie dessen Verwendungsgrenzen und untersuchten Lebensphasen ermittelt. Anschließend erfolgte die Identifizierung der vom System ausgehenden Gefahrenquellen anhand des Gefährdungskatalogs nach EN ISO 12100:2010 sowie deren Beurteilung unter Verwendung der Risikomatrix nach ISO/TR 14121-2 (EN ISO 12100:2010; ISO/TR 14121-2:2012). Die Risikobeurteilung wurde erstellt nach den Prinzipien der EG-Richtlinie 2006/42/EG (Maschinenrichtlinie) und den harmonisierten Normen bzw. technischen Spezifikationen EN ISO 10218-1, EN ISO 10218-2, EN ISO 12100 und ISO/TR 14121-2. Dabei wurden die spezifischen Gefährdungen bezogen auf den Use Case (Kommissionierung, Fahrt bei gleichzeitiger Montage des Roboters sowie Kollaborationsbetrieb) eingehend untersucht.

Das System ist als eine Industrieroboteranlage einzustufen, welche sich für die automatische Kommissionierung von Gütern in einem Person-zur-Ware Kommissioniersystem eignet, das darüber hinaus eine Vormontage der kommissionierten Güter während des Transports der Güter zu einem Montagearbeitsplatz durchführen kann und zusätzlich als kollaborative Roboteranlage die Montage in Zusammenarbeit mit einer Arbeitsperson am Montagearbeitsplatz vornimmt. Die räumlichen Grenzen der Maschine sind aufgrund des mobilen Konzepts nicht fest definiert. Die Gefährdungsermittlung und -beurteilung umfasst die Lebensphase des Betriebs des Systems. Davor und danach liegende Lebensphasen, wie beispielsweise Aufbau, Abbau und Entsorgung sind nicht Teil der Gefährdungsermittlung. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Kombination der beiden Subsysteme zu einem Gesamtsystem sowie dessen Betrieb in unterschiedlichen Betriebsphasen die Notwendigkeit neuer Sicherheitskonzepte und Sicherheitsfunktionen bedingen. Insbesondere sind die nach EN ISO 10218 1 obligatorischen Sicherheitsfunktionen, wie z. B. Not Halt und Kraftbegrenzung den Bedingungen des kombinierten Betriebs der beiden Subsysteme anzupassen (ISO 10218-1:2011). Durch die Überlagerung mehrerer Bewegungsbahnen besteht beispielsweise anhand eines Koordinatentransformationssystems die Möglichkeit zur Ermittlung der resultierenden

Geschwindigkeiten der Roboterbewegungen im fahrenden Betrieb der Plattform. Hiermit wäre die Realisierung der nach EN ISO 10218 1 vorgeschriebenen Kraftbegrenzung auch im fahrenden Betrieb der Plattform möglich (ISO 10218-1:2011). Zudem besteht prioritär die Notwendigkeit der Einrichtung von nicht-trennenden Schutzeinrichtungen um die Gefährdung von Stoß, Eindringen und Durchdringen aufgrund einer Kollision von Personen mit dem Roboterarm bzw. dem gehandhabten Werkstück zu vermeiden. Hierzu wäre aus technischer Sicht der Einsatz von beispielsweise Ultraschallsensoren oder 3D Kameras, welche das Ausblenden von einzelnen Bereichen ermöglichen, erforderlich. Trotz bereits bestehender technischer Lösungsmöglichkeiten, wie für die Einrichtung von nicht-trennenden Schutzeinrichtungen, ist ein Inverkehrbringen von Systemen, welche aus Subsystemen mit entsprechenden Zulassungen am europäischen Markt bestehen, aufgrund neu entstehender Gefährdungen nur schwer möglich, da die entsprechend gültigen harmonisierten Normen und technischen Spezifikationen keine Lösungsmöglichkeiten vorsehen. Schlussfolgernd bleibt damit festzuhalten, dass aufgrund des technischen Fortschritts weiterhin dringender Bedarf an einer beschleunigten Weiterentwicklung der Normen und technischen Spezifikationen besteht.

Identifikation von Risiken auf ethischer, legaler und sozialer Ebene (AMICAI)

Damit auch ethische, legale (rechtliche) und soziale Risiken rechtzeitig noch in der Pre-Implementierungsphase der Roboterplattform abgeschätzt und dadurch auch präventiv aufgegriffen werden können, wurde eine Methode zur Identifikation, Klassifizierung und Analyse derartiger Probleme eingesetzt. Hierzu wurde Anfang 2020 bei der IHK Schwaben in Augsburg ein Workshop nach Vorlage AMICAI (Brandl et al. 2019) durchgeführt. Die am Institut für Arbeitswissenschaft entwickelte Methode AMICAI (Aachen Method for Identification, Classification and Analysis of Innovationbased Problems) stützt sich auf das Prinzip der klassischen Fehlerzustandsart und –auswirkungsanalyse (FMEA), ist jedoch gezielt auf ELSI-Aspekte in der technischen Entwicklung ausgerichtet (Brandl et al. 2019). Im Vorfeld des Workshops wurden von Seiten des Instituts für Arbeitswissenschaft bereits Anwenderunternehmen, Herstellerunternehmen, Wissenschaftler*innen, sowie Verbände und Politik als zentrale Stakeholder festgelegt. Da sich die Technologie noch in der Entwicklung beziehungsweise der Pre-Implementierungsphase befindet, sollten als Zeitraum nicht nur der aktuelle Stand, sondern auch mögliche Entwicklungen der nächsten 5 beziehungsweise 10 Jahren abgeschätzt werden. Insgesamt nahmen 8 Personen aus dem Forschungsverbund teil, darunter Vertreter*innen (Stakeholderzugehörigkeit in Klammern) des Instituts für Arbeitswissenschaft der RWTH Aachen (Wissenschaftlicher Stakeholder / Nutzerperspektive), der IHK Schwaben Augsburg (Verband / Politik), des Fraunhofer IGCV (Wissenschaftlicher Stakeholder / Technische Perspektive), der Firma Mayser (Herstellerunternehmen), der Firma Yaskawa (Herstellerunternehmen), und der Firma Mey Maschinenbau (Anwenderunternehmen). Innerhalb des Workshops wurden zunächst mögliche Probleme hinsichtlich ELSI-Aspekten identifiziert. Beispielfähig wurden daraufhin für einzelne Problempunkte mögliche Ursachen und Auswirkungen identifiziert und Kausalketten gebildet. Diese wurden schrittweise charakterisiert, sowie hinsichtlich der Problemschwere, der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Erkennungswahrscheinlichkeit quantifiziert. Über diese Quantifizierung sollten die schwerwiegendsten Kausalketten identifiziert werden. Für jede Kausalkette wurden darüber hinaus Erkennungsmethoden vorgeschlagen.

Insgesamt wurden im Workshop als größte Problemquellen die möglicherweise geringe Akzeptanz der Technologie von Seiten der Werkskräfte, die zum aktuellen Entwicklungsstand noch geringe Usability der Technologie, die möglicherweise eingeschränkte Flexibilität des Systems, der unklare Schutz der vom System gesammelten Nutzerdaten, das möglicherweise gestörte soziale

Gefüge am Arbeitsplatz, sowie unklare rechtliche Prozesse (beispielsweise fehlende oder unzureichende Normung) benannt. Speziell die Aspekte 1) fehlenden Datenschutzes und 2) fehlender Qualifikation von Nutzer*innen wurden daraufhin aufgegriffen und entsprechend AMICAI exemplarische Kausalketten gebildet und quantifiziert. Hierbei wurden vornehmlich die Sicht der Werkskräfte (individuelle Ebene) oder die der Unternehmen (organisatorische Ebene) zum jetzigen Zeitpunkt und eine Abschätzung für 5 Jahre eingenommen. Die höchste Risikoprioritätsnummer (als Ergebnis aus der Quantifizierung) erzielte bei der im Workshop betrachteten Aspekte das Problem fehlenden Datenschutzes, das sich aus dem Einsatz vielfältiger Sensorik ergibt und bei Werkskräften zu Verunsicherung führen kann. Dieses Problem wurde vor allem in 5 Jahren als gravierend angesehen, wenn die Technologie zunehmend Marktreife erlangt und sollte daher beispielsweise über Experteneinschätzungen, Prozessprüfungen und Nutzerbefragungen rechtzeitig erkannt und daraufhin bearbeitet werden. Als Limitation der Methode AMICAI zeigte sich im Workshop, dass so nur einzelne Kausalketten betrachtet werden konnten, die sich nur schwerlich in ein Netz aus gegenseitigen Abhängigkeiten der Probleme einordnen lassen. AMICAI wurde als praktisch anwendbar anerkannt, aber als zu starke Verknappung komplexer Mechanismen kritisiert (für eine intensivere Diskussion der Limitationen siehe Brandl et al. 2019).

Arbeitspaket 5.5.3: Untersuchung von Roboterskepsis und Interventionskonzipierung

(Die Arbeit in diesem Arbeitspaket entstand in Kooperation zwischen Benedikt Leichtmann und Prof. Verena Nitsch vom Institut für Arbeitswissenschaft der RWTH Aachen und Johanna Hartung und Prof. Oliver Wilhelm vom Institut für Psychologie und Pädagogik der Universität Ulm.)

Bereits bei der Arbeitssystemanalyse (AP 5.1.) deutete sich an, dass die Einführung einer Roboterplattform bei Werkskräften auch mit Unsicherheit behaftet war und dadurch nicht rein positiv aufgefasst wurde (Leichtmann, Schnös, Rinck, Zäh & Nitsch 2017). Aber auch systematischere Untersuchungen im Produktionskontext zeichnen ein solch durchwachsenes Bild aus positiven Erwartungen hinsichtlich einer Arbeitserleichterung einerseits, aber auch Befürchtungen wie beispielsweise des Arbeitsplatzverlusts andererseits (Chao & Kozlowski 1986; Herold, Farmer & Mobley 1995). Aus diesem Grund wurde die Untersuchung der Einstellung von Werkskräften gegenüber mobiler Robotik stärker in den Fokus gerückt und entsprechend als weiteres AP der Evaluation konzipiert (AP 5.5.3.). Hierüber können zudem auch Einflüsse auf höherer Systemebene z.B. der Unterstützungskultur oder der Werkkraft-Management Beziehung besser abgeschätzt werden. Daraufhin wurde im zweiten Förderjahr aufbauend auf psychologischer Literatur zur Messung von Einstellungen en gros (z.B. Neyer, Felber & Gebhardt 2012), sowie auf Arbeiten, die en détail Einstellungen gegenüber Robotern in industriellen Kontexten untersuchten (Chao & Kozlowski 1986; Herold et al. 1995), ein Selbstberichts-Fragebogen zusammen mit der Abteilung Differentialdiagnostik und Psychologische Diagnostik der Universität Ulm entwickelt. In zwei Fragebogenstudien sollten daraufhin im dritten Förderjahr in zwei Schritten 1) der Fragebogen zunächst explorativ hinsichtlich der Messeigenschaften und der Konstruktvalidität, und 2) die Einstellung differentialdiagnostisch auf Zusammenhänge mit Konstrukten auf interindividueller sowie Organisationsebene hin untersucht werden. Aufbauend auf den Ergebnissen sollen Interventionsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Methoden

Zur Messung von Einstellungen gegenüber Robotik wurden $i_{Attitude} = 54$ Items zur Beschreibung der Einstellung bestehend aus Kognitionen (Items, die Vorstellungen bezüglich Auswirkungen der

Einführung eines Roboters beschreiben), Emotionen (Valenzzuschreibung zum Einstellungsobjekt) und Verhaltensintentionen, $i_{Kompetenz} = 7$ Items zur Beschreibung der Einschätzung der eigenen Kompetenz sowie $i_{Kontrolle} = 7$ Items zur Beschreibung der wahrgenommenen Kontrolle entwickelt. Für die Untersuchung wurden dafür bipolare Items entwickelt, bei der über eine fünf-stufige Skala die eigene Einstellung bezüglich zweier gegensätzlicher Aussagen-Pole angegeben werden kann (z.B. Evaluation des Roboters als „gut“ oder „schlecht“). Die Items wurden in einer qualitativen Vorstudie auf Verständlichkeit mit $N = 4$ Personen aus der Allgemeinbevölkerung getestet und modifiziert. Zusätzlich wurden weitere relevante Konstrukte gemessen. Auf interindividueller Ebene wurde hierfür die allgemeine Selbstwirksamkeitserwartung über eine Kurzskala nach Beierlein, Kemper, Kovaleva und Rammstedt (2013), Jobunsicherheit nach Vander Elst, Witte und Cuyper (2014), Vertrauen ins Management nach Mayer und Davis (1999) und die Unterstützungskultur nach eigens entwickelten Items gemessen. Darüber hinaus wurden demographische Variablen wie Alter oder Gender, sowie berufsbezogene Eigenschaften wie Seniorität oder Führungsverantwortung erfasst.

Insgesamt wurden zur Analyse zwei Stichproben erhoben. Über die deutschlandweite Datenbank eines Marktforschungsanbieters wurden $N = 355$ Personen online befragt, die allesamt angaben, Werkkräfte im produzierenden Gewerbe zu sein und Tätigkeiten im Sinne des FORobotics Use Cases ausführen (z.B. Montagearbeiten, Überwachung von Werkzeugmaschinen, Kommissionieren). Von den befragten Personen identifizierten sich 74 Personen als weiblich, 281 als männlich und keine Person diverser oder anderer Geschlechtsidentität. Das mittlere Alter betrug $M = 44,66$ Jahre ($SD = 11,04$) und Personen hatten bisher eher geringe bis keine Erfahrungen mit Robotern.

Die zweite Stichprobe bestand aus $N = 202$ Werkkräften aus Bayerischen Unternehmen des FORobotics Forschungsverbundes, also aus Personen, für die die Einführung eines mobilen Roboters ergo unmittelbare Relevanz hat. Hierbei identifizierten sich 32 Personen als weiblich, 166 Personen als männlich und wiederum keine Person diverser oder anderer Geschlechtsidentität. Das mittlere Alter betrug in dieser Stichprobe $M = 38,49$ Jahre ($SD = 12,70$). Auch diese Stichprobe gab an, eher unerfahren mit Robotern zu sein (150 Personen gaben an noch nie mit einem mobilen Roboter interagiert zu haben).

Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden von Benedikt Leichtmann (RWTH Aachen), Johanna Hartung (Universität Ulm), Professor Oliver Wilhelm (Universität Ulm) und Professor Verena Nitsch (RWTH Aachen) zur Publikation in einem psychologischen Fachjournal eingereicht. Da sich der Fachartikel derzeit noch im Peer-Review verfahren befindet, können Ergebnisse hier nur überblicksartig skizziert werden.

Zur Analyse mit welchen Faktoren sich die Antwortmuster zu den Einstellungsitems am besten beschreiben lassen, wurden Strukturgleichungsmodelle und Netzwerkmodelle berechnet.

Zunächst wurde eine Explorativen Faktorenanalyse mit der Online Stichprobe durchgeführt. Über verschiedene matrix-algebraische und statistische Verfahren wurde ermittelt, dass 5 Faktoren die empirisch ermittelten Datenmuster beschreiben können. Darauf aufbauend wurde eine explorative Faktorenanalyse nach der Hauptachsenmethode mit obliquer Rotation (oblimin) und einer 5-Faktor-Lösung durchgeführt und entsprechend festgelegter Fit-Indices modifiziert. Diese Faktorenlösung wurde in einem zweiten Schritt in einer Konfirmatorischen Faktorenanalyse über Maximum-Likelihood Schätzung mit der Stichprobengröße aus dem Projekt bestätigt und weiter angepasst.

So soll beurteilt werden, wie gut die konstruierten Messmodelle die Daten beschreiben. Als Resultat können die Einstellungen von Werkskräften über 3 Faktoren beschrieben werden. Diese Faktoren können inhaltlich als Faktoren zu „Affekten und Verhaltensintentionen“, „Arbeitsaufgaben- und Arbeitsplatzveränderungen“, und „Veränderungen sozialer Strukturen und menschlicher Werte“ interpretiert werden.

Auf Basis der 3-Faktoren Struktur wurde darüber hinaus ein 12-Item Fragbogen mittels Ant-Colony Optimization gebildet. Diese kurze Skala ermöglicht es Einstellungen in künftigen Untersuchungen zeit-effizient, aber dennoch valide (im Sinne des theoretischen Konstrukts) zu erfassen. Der so entwickelte Fragebogen, sowie ein Manual zur Anwendung können über <https://www.robot.psychologie-tests.de/> eingesehen und nach Absprache mit den Autor*innen in Unternehmen eingesetzt werden.

Eine Analyse weiterer organisationaler Konstrukte wie das Vertrauen der Werkskräfte in das Management, die Unterstützungskultur oder wahrgenommene Jobunsicherheit zeigten, dass Werkskräfte mit einer positiveren Einstellung zur Implementierung einer Roboterplattform in ihrem Unternehmen auch größeres Vertrauen ins Management haben, mehr Unterstützung in ihrem Unternehmen bekommen, und auch weniger Bedenken bezüglich eines Job Verlust haben. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung organisationaler Einflüsse bei der Einführung neuer Technologie.

Interpretation und Interventionsempfehlungen

Auf Basis der Ergebnisse wurde über Mittelwerte der jeweiligen Skalen (von 1 bis 5; ein höherer Wert bedeutet eine positivere Einstellung) berechnet. Während allgemein die Einstellung tendenziell eher positiv ausfällt (Affektive Komponente $M = 3,44$; $SD = 1,44$) und Personen die Einführung im Schnitt eher befürworten (Verhaltensintention $M = 3,39$; $SD = 0,97$), wurden vor allem Besorgnisse bezüglich der Veränderungen im sozialen Gefüge („Durch neue Roboter wird das menschliche Miteinander im Team verloren gehen.“) deutlich ($M = 2,75$; $SD = 0,74$). Es wurde gezeigt, dass dieses mit dem Kontrollempfinden, der wahrgenommenen Arbeitsplatzunsicherheit und dem Vertrauen in das Wohlbefinden des Managements zusammenhängt. Demnach lassen sich folgende Interventionsmaßnahmen zur Vorbeugung einer negativen Einstellung vorschlagen:

1. **Designmaßnahmen:** Vor allem die Kontrollierbarkeit des Systems sollte bei Designentscheidungen sichergestellt werden. Werkskräfte sollten das Gefühl haben, Einfluss darauf zu haben, was bei einer Interaktion passiert.
2. **Organisationale Maßnahmen:** Nicht nur sollte von Seiten des Managements deutlich und transparent kommuniziert werden, inwieweit sich die Einführung des Systems auf die Anstellungssituation auswirken, sondern auch Entlassungen vermieden und im besten Fall gänzlich ausgeschlossen werden, um Verunsicherung in der Belegschaft zu vermeiden. Zusätzlich sollten allgemein Maßnahmen zur Stärkung des Vertrauens in das Wohlbefinden des Managements ergriffen werden.
3. **Arbeitsplatzgestaltung:** Allgemein sollte beispielsweise durch entsprechende Arbeitsplatzgestaltungsmaßnahmen das soziale Gefüge aufrechterhalten werden. Würde beispielsweise ein Arbeitsplatz durch die Einführung der Technologie räumlich isoliert werden, sollten Möglichkeiten geprüft werden, verschiedene Arbeitsplätze räumlich nah zusammenzulegen.

Thematische Kolloquien: Wirtschaftlichkeitsanalyse 1 + 2

Obschon Kriterien des Wohlergehens und der Usability zentral sind, ist letztendlich die Wirtschaftlichkeit einer Technologie ausschlaggebend, nicht nur hinsichtlich der Investitionsentscheidung in einzelnen Unternehmen, sondern auch für deren Weiterentwicklung allgemein und letztendlichen Dissemination auf dem Markt. Aus diesem Grund wurde zusammen mit den Anwenderunternehmen dieses Thema in zwei Workshops besonders fokussiert. Dabei sollte eine Nutzwert-Analyse durchgeführt werden, sowie Kosten durch das Change-Management identifiziert und abgeschätzt werden. Als erster Schritt der Nutzwert-Analyse wurden in einem ersten Workshop 2018 zusammen mit Vertretern der Anwenderunternehmen einzelne Beurteilungskriterien identifiziert, die für die Bewertung des Nutzens herangezogen werden sollen. Hierzu wurden als Kriterien Sicherheit, Systemleistung (Arbeitsqualität, Qualität des Roboters z.B. Robustheit, Quantität), Gesundheit & Wohlbefinden (Akzeptanz, Entlastung), Usability / Gebrauchstauglichkeit (Benutzerfreundlichkeit, Konnektivität), und Flexibilität (Vielseitigkeit, Änderungsaufwand) identifiziert. Im Anschluss fand eine erste Gewichtung der Kriterien statt. Zusätzlich wurden weitere Herausforderungen im Zuge einer möglichen Implementierung neben den reinen Kosten des Roboters und dessen Inbetriebnahme vor Ort besprochen wie beispielsweise die Planung von Schulungen der Werkskräfte oder Änderungen in der Infrastruktur und der Arbeitsplatzgestaltung.

In einem zweiten Workshop im Februar 2020 sollte dann zur Finalisierung der Nutzwertanalyse vorrangig die Bewertung der Kriterien auf Basis der Evaluationsstudien, sowie aus ersten Erfahrungen aus einer Feldphase vorgenommen werden. Darauf aufbauend sollten wichtige nächste Schritte für eine zur Erfüllung noch unzureichend bewerteter Kriterien benannt und als Roadmap auf einer zeitlichen Dimension abgetragen werden. Am zweiten Workshop nahmen wiederum die Firmen Mey Maschinenbau, Krones und MAN als Hauptanwender des Forschungsverbunds teil. Nach der Vorstellung bisheriger Ergebnisse aus den Evaluationsstudien, sowie Erfahrungsberichte aus der Feldphase erfolgte eine erneute Gewichtung der Kriterien.

Insgesamt am höchsten wurden dabei die Kriterien der Systemleistung und Gesundheit und Wohlbefinden (wobei hier vornehmlich die Akzeptanz der Werkskräfte betont wurde) bewertet. Es ist festzuhalten, dass hier jedoch auch die Bewertung der Firmen am meisten streute, was nicht zuletzt auf Erfahrungen beispielsweise mit Akzeptanz aus vergangenen Change-Prozessen beruhte. In Relation weniger hoch gewichtet wurde dazu die Usability und am geringsten die Flexibilität der Technologie. Das Kriterium Sicherheit wurde aus der Gewichtung ausgenommen, da dieses Kriterium in jedem Fall für einen Einsatz voll erfüllt sein muss. Nach einer Gewichtung der Kriterien erfolgte die Bewertung der Kriterien nach deren Grad der Erfüllung. Dabei wurde das Kriterium Gesundheit und Wohlbefinden, sowie die Sicherheit von allen beteiligten Unternehmen als voll erfüllt eingeschätzt. Die Systemleistung wurde im Mittel als eher nicht erfüllt bewertet. Die problematischsten Einschätzungen erhielt die Implementierung der Roboterplattform bezüglich der Kriterien Usability (eher nicht erfüllt) und Flexibilität (eher nicht erfüllt bis nicht erfüllt). Nichtsdestotrotz rechnen alle teilnehmenden Unternehmen, dass ein Einsatz der Roboterplattform innerhalb von 5 Jahren möglich wäre. Die Unternehmen schätzen, dass sich viele erforderliche Maßnahmen vor allem bezüglich der noch unzureichend erfüllten Kriterien, wie im konkreten eine verbesserte Interface-Technologie oder eine Kapazitätserhöhung des Akkus auch mit heutiger Technologie realisieren ließen. Andere Maßnahmen wie ein verbesserter Bewegungsalgorithmus oder Erhöhung der Akzeptanz der Werkskräfte lassen sich nach Ansicht der Partner in den nächsten 5 Jahren realisieren. Optimierungsmaßnahmen wie eine optimierte Mensch-Roboter-Kommunikation via künstlicher Intelligenz werden zwar in weiterer Zukunft (in den kommenden 10 Jahren) erwartet und begrüßt, jedoch nicht als notwendig für eine erste Einführung erachtet.

4.5.4 Kooperationen mit anderen Teilprojekten

Kooperation mit Teilprojekt 1

Mit TP 1 fand vorrangig im ersten Förderjahr im Rahmen der Arbeitssystemanalyse eine intensive Zusammenarbeit statt: Während TP 5 arbeitswissenschaftlich-psychologisch relevante Aspekte untersuchte, nahm TP 1 Analysen hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit mit Fokus auf Betriebsmittel durch. Aus der Zusammenarbeit ging eine gemeinsame Publikation (Leichtmann et al. 2018) hervor.

Kooperation mit Teilprojekt 2

Die Zusammenarbeit mit TP 2 gestaltete sich vor allem als Austausch von Informationen aus den theoretischen Analysen, sowie Erkenntnisse aus der Literaturzusammenschau (AP 5.2.1.) und der Laborstudie (AP 5.2.2.) zu Wohlfühlrhythmen (Empfehlungen siehe AP 5.2.3.), die Eingang in die Gestaltung der lokalen Bahnplanung fanden.

Kooperation mit Teilprojekt 3

Zusammen mit TP 3 wurde eine angemessene Aufgabenteilung (beruhend auf analytischen Arbeiten und Erkenntnissen aus der Feldbeobachtung, AP 5.3.) zwischen menschlichen Nutzer*innen und technischen Systemen diskutiert, die schließlich im Planungssystem berücksichtigt werden.

Kooperation mit Teilprojekt 4

Der engste Austausch fand mit TP 4 statt. Nach einer gemeinsamen Konzipierung des Interface, wurden schließlich einzelne Bestandteile davon in empirischen Untersuchungen durch TP 5 evaluiert. So wurden im ersten Förderjahr intuitive Gestenbefehle identifiziert, im zweiten Förderjahr in einer weiteren Studie erweitert und auf Erlernbarkeit hin überprüft (AP 5.4.1.). Die Erkenntnisse flossen jeweils formativ als Empfehlungen an TP 4 zurück. Des Weiteren wurden auch die durch TP 4 umgesetzte Projektion des Fahrtweges, Warntöne, als auch ein Mockup zur intuitiven Playback Programmierung formativ während des Entwicklungsprozesses in Studien evaluiert (AP 5.4.1.). Die Evaluationsergebnisse wurden daraufhin hinsichtlich der Interfacegestaltung in TP 4 berücksichtigt. Darüber hinaus führten auch analytische Gestaltungsempfehlungen, die beispielsweise durch eine Goal-Directed Task-Analysis erarbeitet wurden, zu nutzerzentrierten Anpassungen wie der Gestaltung des Tablet-Interfaces.

Kooperation mit Teilprojekt D

In allen Laborexperimenten mit der Roboterplattform selbst, war eine enge Zusammenarbeit zwischen TP D und TP 5 für das Gelingen der Studie zentral. Besonders in AP 5.5. zur summativen Evaluation wurde eine ganzheitliche Sicht auf den Demonstrator im Zusammenhang mit dem Arbeitssystem eingenommen. Dabei erfolgte die Konzeption der Tagebuch- und Interviewstudie (zwei systemisch-holistische Ansätze) in enger Zusammenarbeit. Auch für die später geplante Rückführung der gewonnenen Erkenntnisse in die Plattformentwicklung ist ein enger Austausch zwischen TP 5 und TP D von großer Bedeutung.

4.5.5 Veröffentlichungen

- Leichtmann, B.; Schnös, F.; Rinck, P.; Zäh, M.; & Nitsch, V. (2018) Work System Analysis for the User-Centered Development of Cooperative Mobile Robots. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V (Ed.), 64. GfA-Frühjahrskongress.

- Leichtmann, B.; Bercher, P.; Höller, D.; Behnke, G.; Biundo, S.; Nitsch, V.; Baumann, M. (2018). Towards a Companion System Incorporating Human Planning Behavior: A Qualitative Analysis of Human Strategies. In R. Weidner & A. Karafillidis (Eds.), Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen: Dritte Transdisziplinäre Konferenz (pp. 89–98). Hamburg. (Best Paper Award)
- Leichtmann, B.; Nitsch, V. (2018, October). Evaluation of human-robot interaction with mobile robots in work systems during the pre-implementation phase. Technische Universität Berlin. Berlin Summer School Human Factors, Berlin
- Leichtmann, B.; Hartung, J.; Wilhelm, O.; Nitsch, V. (2018). Why are some workers more skeptical than others? – Measuring workers attitudes towards robots in industrial settings. Open Science Framework. <https://osf.io/5d2n4/>
- Leichtmann, B.; Nitsch, V. (2019, September). Effekte von Gender auf die „Wohlfühldistanz“ in der Mensch-Roboter-Interaktion. Poster Session präsentiert bei der 11. Tagung der Fachgruppe Arbeits-, Organisations- & Wirtschaftspsychologie der Deutschen Gesellschaft für Psychologie, Braunschweig.
- Leichtmann, B.; Lottermoser, A.; Berg, J.; Nitsch, V. (2019). Effect of room size and mental workload on personal space in human-robot interaction. Open Science Framework. <https://osf.io/grhn5/>
- Leichtmann, B.; Nitsch, V. (2019). FORobotics - Mobile, kooperierende Roboter zur Unterstützung von Arbeitsprozessen und Beschäftigten in der Produktion. IAW Spectrum, 6-7.
- Leichtmann, B.; Nitsch, V. (2020). How much distance do humans keep toward robots? Literature review, meta-analysis and theoretical considerations on personal space in human-robot interaction. Journal of Environmental Psychology. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2019.101386>

4.5.6 Literaturverzeichnis

- Aiello, J. R. (1987). Human Spatial Behavior. In D. Stokols & I. Altman (Hrsg.), Handbook of Environmental Psychology (S. 389–504). New York: Wiley.*
- Beierlein, C., Kemper, C. J., Kovaleva, A. & Rammstedt, B. (2013). Kurzskala zur Erfassung allgemeiner Selbstwirksamkeitserwartungen (ASKU). Methoden, Daten, Analysen, 7, 251–278.*
- Brandl, C., Wille, M., Nelles, J., Rasche, P., Schäfer, K., Flemisch, F. O. et al. (2019). AMICAL: A Method Based on Risk Analysis to Integrate Responsible Research and Innovation into the Work of Research and Innovation Practitioners. Science and Engineering Ethics. <https://doi.org/10.1007/s11948-019-00114-2>*
- Bunz, E., Chadalavada, R., Andreasson, H., Krug, R., Schindler, M. & Lilienthal, A. J. (2016). Spatial Augmented Reality and Eye Tracking for Evaluating Human Robot Interaction. In Proceedings of RO-MAN 2016 Workshop .*
- Chao, G. T. & Kozlowski, S. W. (1986). Employee Perceptions on the Implementation of Robotic manufacturing Technology. Journal of Applied Psychology, 71(1), 70–76.*
- Creswell (2006). Coosing a Mixed Methods Design. In J. W. Creswell & V. L. Plano Clar (Hrsg.), Designing and Conducting Miced Methods Research (S. 58–89). CA: Thousand Oaks.*
- ISO 9241-210:2010 (2011). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme.*

EN ISO 12100:2010 (2011). Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risiko-bewertung und Risikominderung (ISO 12100:2010).

ISO 10218-1:2011 (2012). Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter.

ISO 10218-2:2011 (2012). Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration.

ISO/TR 14121-2:2012 (2013). Sicherheit von Maschinen - Risikobewertung - Teil 2: Praktischer Leitfaden und Verfahrensbeispiele.

DIN EN ISO 6385:2016 (2016). Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen.

Endsley, M. R., Bolté, B. & Jones, D. G. (2003). Designing for situation awareness. An approach to user-centered design. London: Taylor & Francis.

Gillespie, D. L. & Leffler, A. (1983). Theories of Nonverbal Behavior: A Critical Review of Proxemics Research. *Sociological Theory*, 1, 120. <https://doi.org/10.2307/202049>

Grote, G., Wäfler, T., Ryser, C. & Weik, S. (1999). Wie sich Mensch und Technik sinnvoll ergänzen: Die Analyse automatisierter Produktionssysteme mit KOMPASS. Mensch, Technik, Organisation (19. Aufl.). Zürich: vdf Hochsch.-Verl. an der ETH.

Hayes, B. E., Perander, J., Smecko, T. & Trask, J. (1998). Measuring Perceptions of Workplace Safety. *Journal of Safety Research*, 29(3), 145–161. [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(98\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(98)00011-5)

Herold, D. M., Farmer, S. M. & Mobley, M. I. (1995). Pre-Implementation Attitudes Toward the Introduction of Robots in a Unionized Environment. *Journal of Engineering and Technology Management*, 12(3), 155–173.

Johnson, R. B., Onwuegbuzie, A. J. & Turner, L. A. (2007). Toward a Definition of Mixed Methods Research. *Journal of Mixed Methods Research*, 1(2), 112–133.

Köpsel, A. & Huckauf, A. (2013). Evaluation of static and dynamic freehand gestures in device control. In *Proc. of the Tilburg Gesture Research Meeting*.

Leichtmann, B., Hartung, J., Wilhelm, O. & Nitsch, V. (2018). Why are some workers more skeptical than others? – Measuring workers attitudes towards robots in industrial settings. Verfügbar unter <https://osf.io/5d2n4/>

Leichtmann, B. & Nitsch, V. (2020). How much distance do humans keep toward robots? Literature review, meta-analysis, and theoretical considerations on personal space in human-robot interaction. *Journal of Environmental Psychology*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2019.101386>

Leichtmann, B., Schnös, F., Rinck, P., Zäh, M. & Nitsch, V. (2017). Work System Analysis for the User-Centered Development of Cooperative Mobile Robots. In *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V (Hrsg.)*, 64. GfA-Frühjahrskongress.

MacKinnon, D. P., Fairchild, A. J. & Fritz, M. S. (2007). Mediation analysis. *Annual Review of Psychology*, 58, 593–614. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.58.110405.085542>

Mayer, R. C. & Davis, J. H. (1999). The effect of the performance appraisal system on trust for management: A field quasi-experiment. *Journal of Applied Psychology*, 84(1), 123–136. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.84.1.123>

Muthukrishna, M. & Henrich, J. (2019). A problem in theory. *Nature Human Behaviour*, 3(3), 221–229. <https://doi.org/10.1038/s41562-018-0522-1>

Neyer, F. J., Felber, J. & Gebhardt, C. (2012). Entwicklung und Validierung einer Kurzskaala zur Erfassung von Technikbereitschaft. *Diagnostica*, 58(2), 87–99.

Nielsen, J. (1994). Enhancing the explanatory power of usability heuristics. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 152–158).

Oesterreich, R., Leitner, K. & Resch, M. (2000). Analyse psychischer Anforderungen und Belastungen in der Produktionsarbeit. *Das Verfahren RIHA/VERA-Produktion Handbuch*. Göttingen: Hogrefe.

Orendt, E. M., Fichtner, M. & Henrich, D. (2017). MINERIC toolkit: Measuring instruments to evaluate robustness and intuitiveness of robot programming concepts. In *26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication : (RO-MAN)*. Lisbon, Portugal. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2017.8172484>

Rossee, Y. (2012). lavaan : An R Package for Structural Equation Modeling. *Journal of Statistical Software*, 48(2). <https://doi.org/10.18637/jss.v048.i02>

Steyer, R., Notz, P., Schwenkmezger, P. & Eid, M. (1997). *Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen*. Göttingen: Hogrefe.

Sundstrom, E. (1975). An Experimental Study of Crowding: Effects of Room Size, Intrusion, and Goal Blocking on Nonverbal Behavior, Self-Disclosure, and Self-Reported Stress. *Journal of Personality and Social Psychology*, 32(4), 645–654.

Tarafdar, M., Tu, Q. & Ragu-Nathan, T. S. (2010). Impact of Technostress on End-User Satisfaction and Performance. *Journal of Management Information Systems*, 27(3), 303–334. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222270311>

Tenner, E. (1997). *Why things bite back. Technology and the revenge of unintended consequences* (1. Vintage Books ed.). New York: Random House.

Vander Elst, T., Witte, H. de & Cuyper, N. de. (2014). The Job Insecurity Scale: A psychometric evaluation across five European countries. *European Journal of Work and Organizational Psychology*, 23(3), 364–380. <https://doi.org/10.1080/1359432X.2012.745989>

.

4.6 Teilprojekt D – Demonstrator

Michaela Krä, Andreas Blank, Markus Hiller, Michael Riedl, Benedikt Leichtmann, Lisa Heuss, Sebastian Roder, Albrecht Lottermoser, Julia Berger

4.6.1 Allgemeine Angaben

Beteiligte Partner:

■ Alle

Projektleitung:

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV

4.6.2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Die Aufgabe von Teilprojekt Demonstrator im Forschungsverbundprojekt bestand in der Umsetzung und Evaluierung eines übergreifenden Demonstrators, der die Forschungsinhalte der zuvor beschriebenen Teilprojekte in einen gemeinsamen Kontext überführt und die Schnittstellen zwischen den Teilprojekten aufzeigt. Des Weiteren war es gemeinsam mit TP 5 an den Evaluationen der Anwendungsfälle bei den Firmen vor Ort zuständig.

Hierfür wurden im ersten Projektjahr mit Hilfe der Arbeitssystemanalyse von TP 1 und TP 5 Anwendungsfälle bei den Anwendungspartnern MAN, Krones und Mey Maschinenbau analysiert und die Rahmenbedingungen hinsichtlich der Untersuchung dieser im Forschungsprojekt definiert. Im nächsten Schritt wurden die Anwendungsfälle in einen zentralen Use Case überführt und daraus zu entwickelnde Teilkonzepte abgeleitet.

Im zweiten Projektjahr wurde der Demonstrator in der ersten Ausbaustufe aufgebaut und evaluiert. Im Fokus hierbei stand besonders die Zusammenarbeit aus Mensch und Roboter. Im letzten Projektjahr wurde der Demonstrator um Szenarien der Roboter-Roboter-Zusammenarbeit erweitert und es wurde erarbeitet, welche ad-hoc Szenarien auftreten können und wie diese zu gestalten sind.

4.6.3 Stand der Ergebnisse zum Projektabschluss

Arbeitspaket D1: Analyse der Anwendungsfälle und Spezifikation der Rahmenbedingungen

Im ersten Arbeitspaket wurden bei den drei Anwendungspartnern MAN, Krones und Mey Maschinenbau Arbeitssystemanalysen aus technischer und arbeitspsychologischer Sicht durchgeführt. Dabei wurden Arbeitsplätze und Tätigkeiten identifiziert, an denen einerseits mobile Roboter und andererseits ein Team bestehend aus Mensch und Roboter eingesetzt werden kann.

Ziel der Analyse war es zudem, Gemeinsamkeiten zwischen den einzelnen Arbeitssystemen aufzuzeigen, um diese in ein gemeinsames Use Case Szenario zu überführen.

Arbeitspaket D2: Entwicklung Gesamtkonzept des Demonstrators

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus Arbeitspaket D1 wurde ein Gesamtkonzept für einen Use Case entwickelt, das die Anwendungsfälle der Anwendungspartner in einem Szenario umfasst.

In dieses Gesamtkonzept flossen die Forschungsaspekte der einzelnen Teilprojekte ein. Die nachfolgende Abbildung 81 stellt das Gesamtkonzept des Use Cases dar.

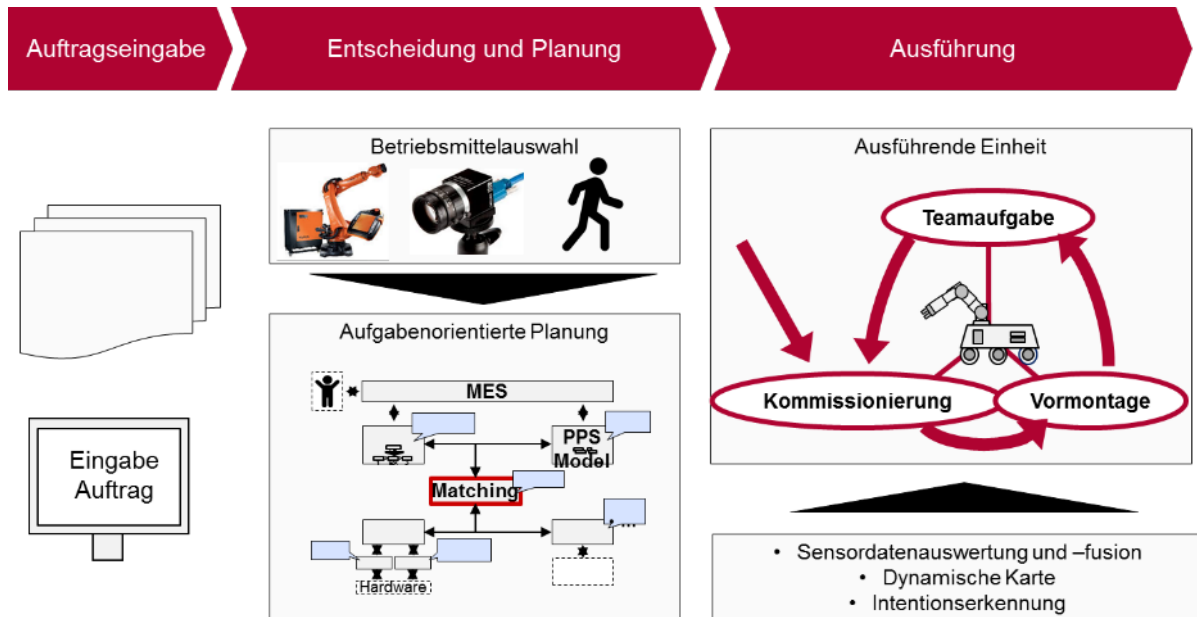


Abbildung 81: Use Case Gesamtübersicht

Über das Teilprojekt 3 wird ein Auftrag in ein überlagertes Planungs- und Steuerungssystem eingelastet. Diesem Auftrag werden zunächst die benötigten Ressourcen zugewiesen und bei Bedarf entschieden, ob für den Auftrag ein Roboter- oder Mensch-Roboter-Team notwendig ist. Hierfür wird der Auftrag zerlegt und den entsprechenden Jobs die Fähigkeiten der Ressourcen zugeordnet. Bei erfolgreicher Zuordnung wird das Produktionsprogramm erstellt, das an die Steuerung weitergegeben wird. Dieses sendet zum Zeitpunkt der Auftragsausführung eine entsprechende Informationsdatei an die zugewiesene Ressource, die diese Informationen extrahiert und intern an die benötigten Betriebsmittel weiterleitet.

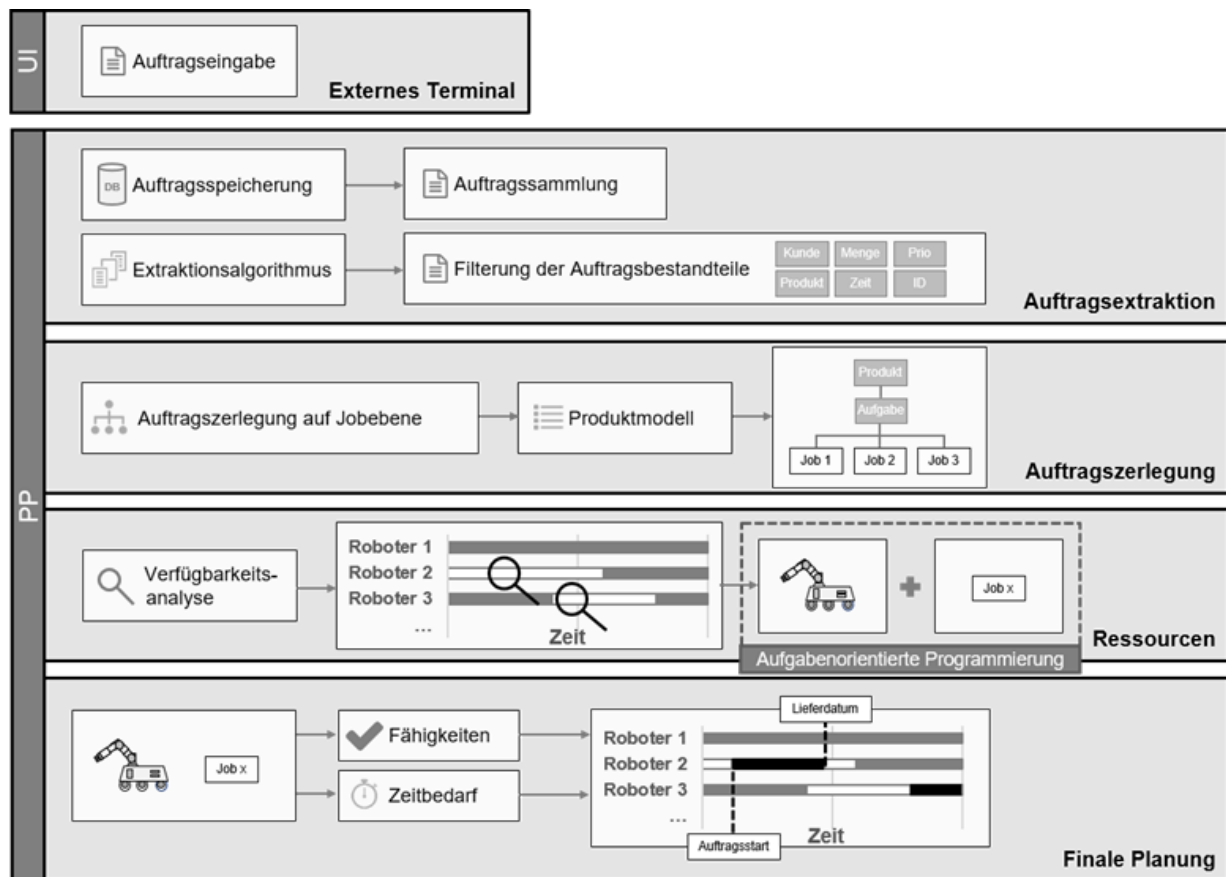


Abbildung 82: Ablauf des Use Cases aus Sicht der Gesamtarchitektur

In FORobotics stehen für den Use Case zwei mobile Roboter zur Verfügung. Ein mobiler Roboter besitzt die Fähigkeit, Elektromotoren handzuhaben, der andere, Kleinteile zu kommissionieren. Somit wird bei Auftragseinlastung dem jeweiligen System die entsprechenden Aufgaben zugewiesen.

Arbeitspaket D3: Entwicklung Teilkonzepte des Demonstrators

Basierend auf diesem Gesamtkonzept wurden weitere Teilkonzepte definiert und ausgearbeitet, die im Gesamt-Use Case implementiert wurden.

Diese Teilkonzepte umfassen dabei die Bereiche *Kommissionierung*, *fahrtbegleitende Vormontage* und *Teamaufgabe*.

Im Fall der Kommissionierung sollen in einem Lager sowohl Elektromotoren als auch Schüttgutboxen von mobilen Robotern in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Fähigkeit gehandhabt werden. Im nächsten Schritt werden in der fahrtbegleitenden Vormontage Objekte aus den Schüttgutboxen kamerabasiert gegriffen und in eine spezielle Halterung, eine sog. Setup-Platte eingelegt werden. Somit soll das Potential von mobiler Robotik aufgezeigt werden, da der eigentliche Transport durch die manipulative Aufgabe zu einem wertschöpfenden Prozess wird. Im letzten Schritt wird in einer Teamaufgabe, die aus 2 Akteuren besteht, die Motor-Montage durchgeführt. Dabei wird der zuvor kommissionierte Elektromotor in einen speziellen Montagering eingesetzt und verschraubt. Hierfür werden die spezifischen Fähigkeiten der einzelnen Akteure ausgenutzt.

Arbeitspaket D4: Gesamtintegration 1. Ausbaustufe

Im zweiten Projektjahr erfolgte der Aufbau des Demonstrators, der den Use Case mit den Teilaufgaben *Kommissionierung*, *fahrtbegleitende Vormontage* und *Teamaufgabe* abdeckt. Da in der 1. Ausbaustufe nur ein mobiler Roboter zur Verfügung stand, wurde insbesondere der Fall der Motor-Kommissionierung und Montage gemeinsam mit dem Menschen gezeigt (siehe Abbildung 81).

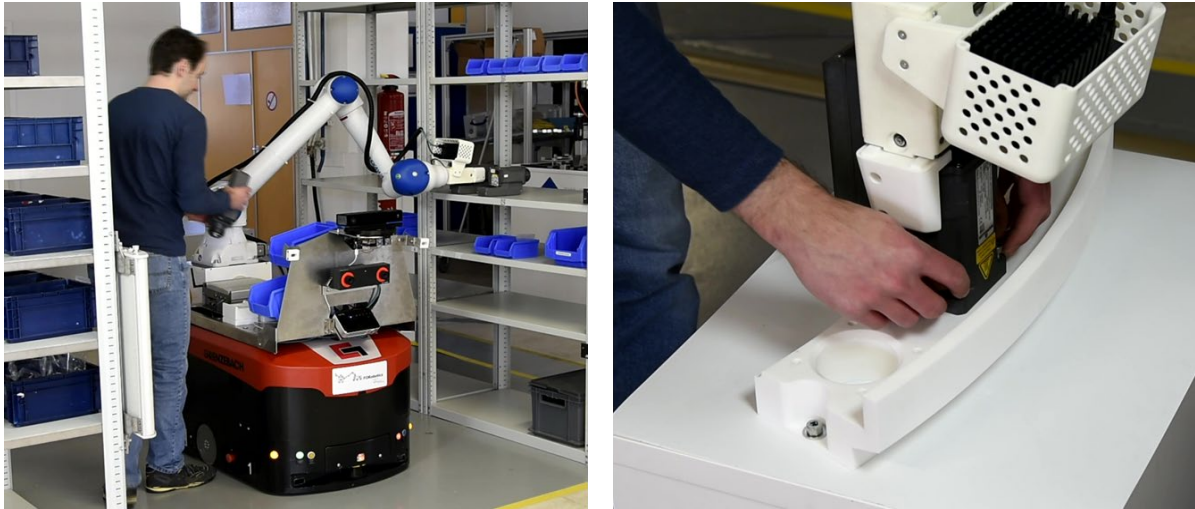


Abbildung 83: Links: ad-hoc Szenario mit einem Menschen; rechts: Gemeinsame Montage eines Motors

In diesem Szenario wurde über ein übergeordnetes Planungssystem, das von TP 3 aufgebaut und implementiert wurde, ein Auftrag erzeugt. Dieser wurde aufgabenorientiert geplant und an die Plattform übermittelt. Der Auftrag bestand aus einer Kommissionieraufgabe im Lager, in dem fünf Elektromotoren mit dem Manipulator der Plattform gegriffen wurden. Diese wurden im Anschluss an einen Montagering transportiert und dort gemeinsam mit dem Menschen montiert. In der 1. Ausbaustufe wurde der Roboter mit Hilfe der Kraft-/Momentensensoren vom Menschen geführt und die Motoren in den Montagering eingesetzt.

Im Fokus bei diesem Ablauf stand die Zusammenarbeit von Menschen und Robotern und wie ein Mensch in den Prozess des Roboters eingreifen und diesen unterstützen kann.

Am Beispiel der Kommissionierung im Lager wurde so dargestellt, wie ein Mensch ad-hoc in die Arbeit des mobilen Roboters eingreifen kann. Dazu hat eine Person während des Kommissionierprozesses den Manipulator spontan unterstützt, indem ein Arbeitsschritt durch die manuelle Kommissionierung eines Motors durchgeführt wurde. Dieser Eingriff wurde mit Hilfe einer Kameraerkennung festgestellt und somit die durch den manuell abgelegten Motor belegte Position auf dem Bauchladen des mobilen Roboters identifiziert.

Des Weiteren wurde die kollaborierende Montage zwischen einem Menschen dem Manipulator des mobilen Roboters vorgeführt. Der gesamte Ablauf ist in Abbildung 84 dargestellt.



Abbildung 84: Ablauf des Demonstrator-Szenarios der 1. Ausbaustufe

Arbeitspaket D5: Gesamtintegration 2. Ausbaustufe

In der 1. Ausbaustufe des Demonstrators stand insbesondere der Use Case der Motormontage und die Zusammenarbeit mit dem Menschen im Vordergrund. Ziel hierbei war es, den Prozess der Motormontage mit möglichen Lösungsstrategien abzubilden.

Im dritten Projektjahr wurde die Zusammenarbeit des Mensch-Roboter-Teams noch erweitert um potentielle Havarieszenarien und deren Lösungsstrategien. Hierbei wurde untersucht, wie der Mensch mit Hilfe technischer Unterstützung den Roboter im Fehlerfall bedienen und den Fehler beheben kann.

Darüber hinaus wurden in der 2. Ausbaustufe die Einsatzmöglichkeiten von mehreren mobilen Robotern, die sich ad-hoc zu Teams zusammenschließen können, thematisiert und im Demonstrator umgesetzt. Diese ad-hoc Zusammenarbeit zwischen Robotersystemen tritt besonders dann auf, wenn die Fähigkeit einer Plattform nicht ausreicht, eine bestimmte Tätigkeit auszuführen und es zeitlich zu lange dauern würde, diese Fähigkeit zu erlangen beispielsweise durch das Wechseln des Greifwerkzeuges. In diesem Fall kann ein anderes Robotersystem das erste Robotersystem unterstützen, um die Aufgabe zu lösen.

Im Folgenden wird zunächst der aktuelle Stand des Gesamtdemonstrators beschrieben. Im Anschluss daran folgen Berichte von den durchgeführten Feldtests sowie von dem in Augsburg aufgebauten Testbed.

Nachdem seit dem dritten Jahr beide mobilen Roboter zur Verfügung stehen, wurde der in der ersten Ausbaustufe gezeigte Ablauf erweitert:

Einer der beiden mobilen Roboter besitzt die Fähigkeit, Motoren zu kommissionieren und im Rahmen einer Montageaufgabe handzuhaben. Die zweite Plattform hat die Fähigkeit, Schüttgutboxen zu greifen und Kleinteile aus den Schüttgutboxen in eine Setup-Platte einzusetzen.

Im Demonstrator wird durch TP 3 gezeigt, wie Aufträge spezifisch je nach Fähigkeit einem mobilen Roboter zugeordnet werden und dieser somit für einen Auftrag verplant wird. Dabei wird der generierte Auftrag ressourcenspezifisch generiert und die einzelnen Aufgabenpakete dem entsprechenden mobilen Roboter übermittelt. Dieser weist den benötigten Ressourcen die entsprechenden Aufgaben zu und beginnt den Prozess.

Im Demonstrator werden dabei Elektromotoren aus einem Lager gegriffen und auf dem Bauchladen eingesetzt. Die zweite Plattform bekommt den Auftrag Schaltstangen zu kommissionieren und eine entsprechende Anzahl in eine Setup-Platte einzusetzen. Hierbei greift der Manipulator der Plattform im Lager eine Schüttgutbox mit den Schaltstangen und legt diese ebenfalls auf seinem Bauchladen ab. Beide Plattformen befinden sich in diesem Szenario im Lager und in direkter Manipulationsreichweite. Ein mögliches ad-hoc Szenario wäre in diesem Fall, wenn die Plattform, die die Motoren handhabt, noch eine Schüttgutbox mit benötigten Schrauben transportieren müsste. Dieser neue Auftrag könnte so ohne weiteres nicht von dieser Plattform erfüllt werden, da das aktuelle Greifwerkzeug nicht die Möglichkeit zum Greifen von Kisten besitzt. Mit der Fähigkeit, das Greifwerkzeug zu wechseln, wäre dieser mobile Roboter jedoch in der Lage, den Auftrag zu erfüllen. Da der Prozess, das Greifwerkzeug zu wechseln allerdings eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen würde, könnte in diesem Fall der andere mobile Roboter aushelfen, indem er die Schüttgutbox greift und auf den Bauchladen der ersten Plattform abstellt. Mit diesem ad-hoc Szenario könnten die Fähigkeiten beider Plattformen kombiniert und somit die Aufgabe im Team ad-hoc bewältigt werden. Diese Fähigkeit, ad-hoc zu interagieren, erfordert allerdings eine entsprechende Steuerungsarchitektur. Diese wurde in TP 3 bereits ausführlich beschrieben. Die technische Umsetzung der Handhabungsaufgaben und des ad-hoc Szenarios erfolgte durch TP 2.

Im dritten Projektjahr wurden in TP 4 außerdem Möglichkeiten aufgezeigt, im Fehlerfall mit dem mobilen Roboter zu interagieren, um einen Fehler zu beheben. Dazu wurden entsprechende Fälle identifiziert. Zum einen besteht die Wahrscheinlichkeit, dass ein Hindernis die Fahrroute der mobilen Plattform blockiert. In diesem Fall kann mit Hilfe entsprechender Interaktionsgeräte wie einer Smartwatch eine Werkkraft in der Nähe verständigt werden, die den Fehler beheben kann. Da in größeren Unternehmen nicht jeder Mitarbeiter in mobiler Robotik geschult werden kann, soll die Fehlerbehebung und Interaktion möglichst intuitiv erfolgen. Im Fall des aufgetretenen Hindernisses kann der herbeigerufenen Werkkraft über ein Tablet Instruktionen angezeigt werden, wie die Plattform wieder in Betrieb zu setzen ist. Nachdem die Aufgabe erledigt wurde, kann er den Erfolg über das Tablet bestätigen und somit den Wiederanlauf des Auftrags im Planungssystem bestätigen. Eine detailliertere Beschreibung dieses Vorgangs befindet sich in TP 4.

Ein anderes Havarieszenario wäre, wenn während der fahrtbegleitenden Vormontage ein Problem beim Erkennen und Greifen der Objekte entsteht. Um dieses Problem zu lösen, wird eine im Umgang mit dem Manipulator ausgebildete Fachkraft benötigt. Bei einer Flotte und einem großflächigeren Einsatz dieser mobilen Plattformen ist eine Teleoperation des Manipulators von Vorteil. Im Forschungsverbundprojekt soll diese Option demonstriert werden. Dazu schaltet sich der Teleoperator auf den entsprechenden mobilen Roboter auf und beginnt den Manipulator zu steuern. Im Fall von FORobotics unterstützt er den Manipulator beim Greifen der Schaltstangen und beim

Ablegen in die Setup-Platte. Dadurch kann ein Teleoperator prinzipiell mehrere mobile Roboter bedienen und im Fehlerfall schnell Abhilfe schaffen.

Des Weiteren wird im Demonstrator das kamerabasierte Einsetzen des Elektromotors in eine entsprechende Halterung vorgeführt. Hierbei referenziert sich der mobile Roboter an seiner Arbeitsstation und setzt den Motor in den vorgesehenen Ring ein.

Mit Hilfe der eingesetzten Interaktionssysteme, die am mobilen Roboter installiert sind, ist es darüber hinaus möglich, ad-hoc einen neuen Auftrag im Planungssystem einzulasten, der dort vor dem Hintergrund der Ressourcenauslastung geprüft und daraufhin freigegeben wird. Dieser Sonderauftrag kann je nach Situation über das Tablet oder eine Sprachsteuerung eingegeben werden. Ein Feedback erhält die entsprechende Werkskraft zum einen über das Tablet, den Beamer oder die Sprachausgabe. Somit kann auf eine fachspezifische Schulung der Werkkräfte verzichtet werden, da die Ein- und Ausgabemöglichkeiten intuitiv gehalten wurden. Der Ablauf des Demonstrators in der 2. Ausbaustufe zeigt nachfolgende Abbildung 85.



Abbildung 85: Ablauf des Demonstrator-Szenarios der 2. Ausbaustufe

Der Demonstrator in FORobotics bietet somit die Möglichkeit, die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte und der entsprechenden Teil-Demonstratoren in einen gemeinsamen Kontext zu überführen. Somit können die Potentiale, die die mobile Robotik der Industrie in Zukunft bieten wird, aufgezeigt werden.

Um die einzelnen Aspekte des Gesamtdemonstrators fokussiert zu betrachten, wurden am FAPS in Erlangen, am iwB in München, an der Uni Bayreuth und an der Uni Augsburg sowie am Fraunhofer IGCV in Augsburg Teildemonstratoren aufgebaut, die auf den folgenden Seiten dargestellt sind. Diese werden im Hinblick auf ihre Funktionalität kurz erläutert:

Demonstrator zu Fahrerlosen Transportsystemen am *iwb*

Standort: *iwb*

Beteiligte Partner: *iwb*

Beteiligte Teilprojekte: TP 1, TP 2

Im ersten Jahr wurde ein Demonstrator für die dynamische Pfadplanung am *iwb* aufgebaut, um als Forschungsträger bis zur Fertigstellung des mobilen Roboters durch Grenzebach und Yaskawa eingesetzt zu werden. Dafür wurde ein vorhandenes Fahrerloses Transportsystem (FTS, Typ Spurcarrier von ANT-System) mit einem LiDAR-Sensor (Hokuyo URG-04LX) und Laser-Sicherheitsscannern (Sick) ausgerüstet und eine ROS-Anbindung geschaffen. Die Plattform diente der Erforschung von Kartierung, Navigation und dynamischer Pfadplanung (vgl. TP 2 in Reinhart et al 2017). Ebenfalls wurden die Konzepte der Hardware-Abstraktion und Betriebsmittel-Dienste-Beschreibung am FTS detailliert (vgl. Reinhart et al 2017, 2018).

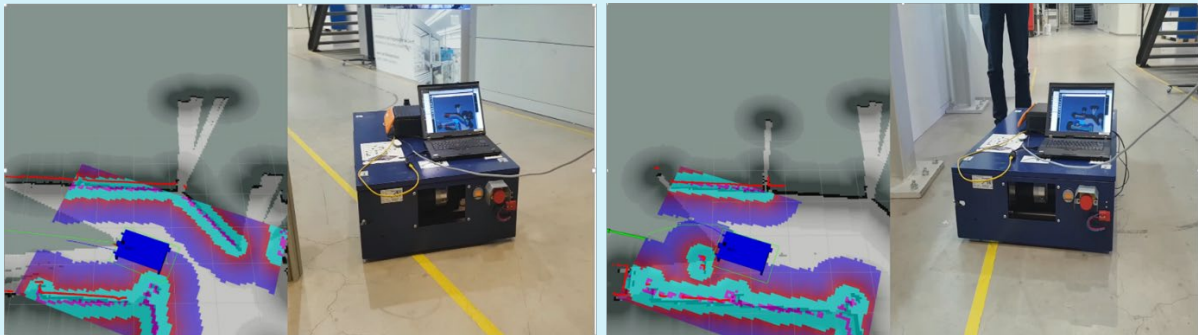


Abbildung 86: Umgebungsmappe und Fotografie des FTS an zwei Orten der Versuchshalle. Zuerst fährt das FTS um die Kurve (l. und 2.v.l.), dann taucht ein Mensch im Fahrweg des FTS auf (2.v.r. und r.) und der Pfad muss dynamisch angepasst werden. (aus Lehnert 2017).

Demonstrator für Sichtlagerkistenkommissionierung am *iwb*

Standort: *iwb*

Beteiligte Partner: *iwb*, Hefter, Yasakawa, Roboception, PTM

Beteiligte Teilprojekte: TP 1, TP 2, TP 3

Dieser Teildemonstrator wurde im zweiten Jahr aufgebaut für die Umsetzung des Hefter-Anwendungsfalls zur Sichtlagerkisten-Kommissionierung. Dafür wurden Regale und Kisten mit Markern versehen und mit einem Kamerasystem referenziert. In der Demonstration wird die Kiste durch einen stationären Roboter auf ein FTS verladen; für den Gesamtdemonstrator lässt sich dieses Verfahren auf einen mobilen Roboter übertragen. Dieser Teildemonstrator wurde nach dem zweiten Projektjahr umgebaut zur Realisierung des Krones-Anwendungsfalls.



Abbildung 87: Versuchsstand des *iwb* für die Kommissionierung von Sichtlagerkisten. Zu sehen ist ein Yaskawa MH24 ausgestattet mit einem PTM-Greifer und einer Roboception-Kamera (links) und ein fahrerloses Transportsystem (rechts).

Demonstrator für Motorkommissionierung und Motormontage am *iwb*

Standort: *iwb*

Beteiligte Partner: *iwb*, Krones, Hefter, Yasakawa, Roboception, PTM

Beteiligte Teilprojekte: TP 1, TP 2, TP 3

Dieser Teildemonstrator wurde im dritten Projektjahr aufgebaut, um den Krones-Anwendungsfall umzusetzen. Er besteht aus einem Yaskawa HC 10 mit YRC 1000, der mit einer Roboception-Stereokamera zur Umgebungserkennung und einem Spezialgreifer für die Krones-Motoren (entwickelt von Hefter auf Grundlage eines PTM-Greifers) als Endeffektor ausgestattet ist. Der Aufbau mit Manipulator und Endeffektor entspricht direkt der Krones-Plattform. Somit simuliert dieser stationäre Demonstrator die ortsflexiblen Tätigkeiten im Krones-Anwendungsfall. Dies wird anhand Abbildung 88 erläutert.

Zuerst findet die Motorentnahme aus dem Regal statt (linker Bildausschnitt). Der Roboter lokalisiert mittels Markern die Motoren im Regal. Die Motoren werden einzeln gegriffen und in die Halterungen des Bauchladens abgelegt (mittlerer Bildausschnitt). Anschließend werden die Motoren aus den Halterungen entnommen, der Montagering visuell lokalisiert und die Servomotoren in die Aufnahmen im Montagering eingesetzt (rechter Bildausschnitt). Hierzu wurden die notwendigen Roboterfähigkeiten spezifiziert sowie implementiert und in die Skill-basierte Softwarearchitektur inkl. Task-Management integriert. (vgl. TP 1 AP 1.3-1.4).



Abbildung 88: Ablauf der Motorkommissionierung und –montage mit dem HC10

Demonstrator zur dynamischen Weltmodellierung für mehrere mobile Roboter bei ITQ

Standort: ITQ

Beteiligte Partner: ITQ, *iwb*

Beteiligte Teilprojekte: TP 2, TP 3

In Kooperation von ITQ und *iwb* wurde ein geteiltes Weltmodell für mehrere mobile Roboter mit dynamischer Trajektorienrepräsentation entwickelt. Der Demonstrator basiert auf einer Büroumgebung und soll das Zusammenspiel von Menschen und mobilen Robotern in teilstrukturierten Umgebungen untersuchen. Die Ergebnisse von Bürogängen sind bspw. übertragbar auf Gassen in Produktionshallen. Der Demonstrator besteht aus einem Server mit dem Weltmodell sowie mehreren Clients, welche die Karte lesen und erweitern. An einem Use-Case konnte die Sicherheits- und Performancegewinn der dynamischen Modellierung im Kreuzungsbereichen demonstriert werden (vgl. Roder et al. 2020 und Rothmeyer 2019).

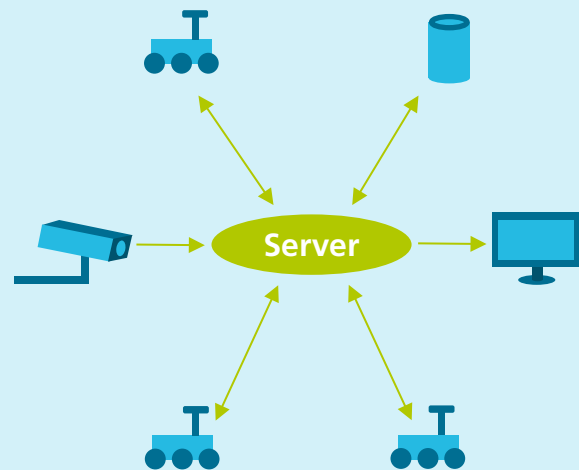


Abbildung 89: Mobiles Roboterfahrzeug von ITQ aus Rothmeyer 2019 (links) und schematischer Aufbau des geteilten Weltmodells aus Roder et al. 2020 (rechts)

Demonstrator zur Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) bei MAN

Standort: MAN

Beteiligte Partner: MAN, *iwb*

Beteiligte Teilprojekte: TP1

Bei dem Industriepartner MAN wurde ein Demonstrator zur Bewertung der Potentiale sowie Herausforderungen im Einsatz von kollaborierenden Robotern entwickelt und umgesetzt. Der betrachtete Prozess wurde mit Hilfe der innerhalb von TP 1 entwickelten Methode zur Identifikation und Bewertung von MRI-Anwendungen ausgewählt (siehe AP 1.1.3). Bei dem Prozess handelt es sich um den Auftrag von Flüssigdichtmittel auf den Abschlussdeckel des Außenplanetengetriebes einer LKW-Achse sowie die anschließende Montage von diesem (siehe Abbildung 90). Aufbau und Funktionsweise des Demonstrators wurden im Detail in Baldauf (2019) vorgestellt und werden im Folgenden zusammenfassend beschrieben:

Der Mitarbeitende bestückt die beiden Halterungen im Arbeitsbereich des Roboters mit Abschlussdeckeln. Der Roboter trägt mit Hilfe eines Kleberrollers das Flüssigdichtmittel auf die beiden Abschlussdeckel auf. Anschließend werden diese vom Mitarbeitenden an die Achse montiert. Für den beschriebenen Prozess wurde innerhalb des letzten Jahres ein entsprechender Roboter inkl. Peripherie und geeignetem Sicherheitskonzept entwickelt und aufgebaut. Der entstandene Demonstrator wurde zuerst in einem Testumfeld abseits des Produktivbetriebs evaluiert. Hierbei konnten die durch die Methodik aus TP 1 vorhergesagten Potentiale der MRI-Applikation bereits positiv bestätigt werden. (Baldauf 2019)

Anschließend wurde der Roboter am Montageband in Betrieb genommen und funktioniert entsprechend der abgeschätzten Potentiale und Auswirkungen. Die vorgestellte Anwendung tritt bei MAN nur bei bestimmten Varianten auf. Aus diesem Grund ist es denkbar, dass in Zukunft ein mobiler Roboter die Aufgabe übernimmt und so aufgrund seiner Ortsflexibilität innerhalb der aktuellen Standzeiten weitere Aufgaben an anderer Stelle mit übernimmt.

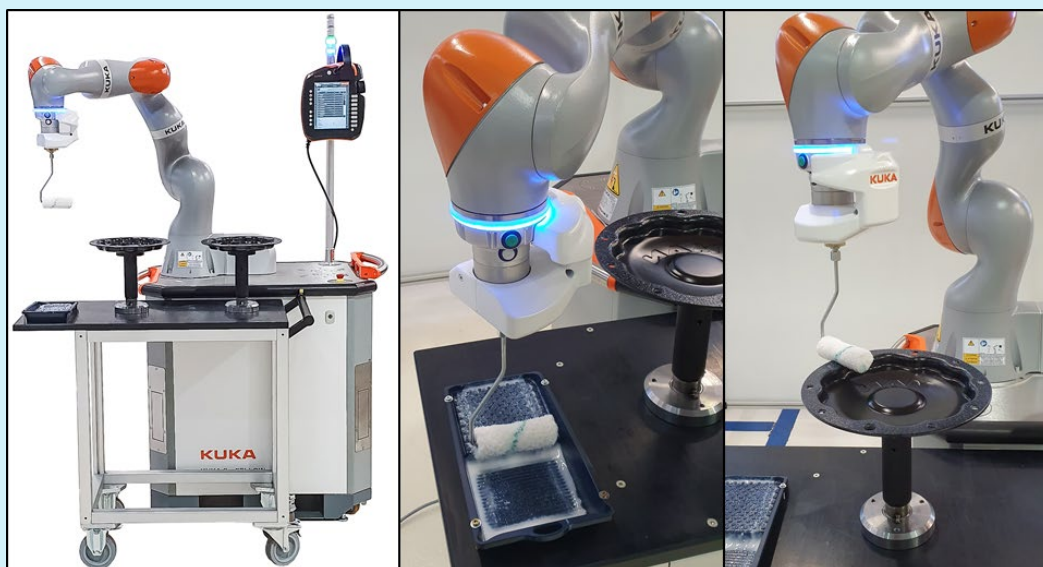


Abbildung 90: Überblick über die MRI-Applikation für den Dichtmittelauftrag (links), Detailansicht der Dichtmittelaufnahme (mitte) und des Dichtmittelauftrags (rechts) aus Baldauf 2019

Virtueller Demonstrator in Gazebo bestehend aus OpenManipulator mit Turtlebot 3 und KUKA Youbot

Standort: *iwb*

Beteiligte Partner: *iwb*

Beteiligte Teilprojekte: TP 1, TP 2 und TP 3

Im Vergleich zum Aufbau eines Versuchstands mit realem Robotersystem, bietet der Test von Software-Systemen in einer Simulationsumgebung viele Vorteile. Modifikationen am System können schnell und einfach mit unterschiedlichen Randbedingungen getestet werden. Aus diesem Grund wurde am *iwb* von Dengler (2019) ein Demonstrator mit Hilfe der Simulationsumgebung Gazebo aufgebaut. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Robotersysteme eingebunden:

- OpenManipulator mit Turtlebot 3 (siehe Heuss et al. 2019, Dengler 2019)
- KUKA YouBot (siehe Dengler 2019)

Die beiden simulierten Robotersysteme wurden zur Validierung unterschiedlicher Lösungsbau-
steine mit Fokus auf die Skill-basierte Software-Architektur und Kommunikationsarchitektur auf
Basis von OPC UA in den TPs 1-3 genutzt.

Durch die Implementierung der in FORobotics entwickelten Konzepte auf zwei oder mehr Robo-
tersystemen konnte so die Übertragbarkeit der entstandenen Systemlösungen auf Robotersysteme
mit unterschiedlichen Aufbau demonstriert werden.

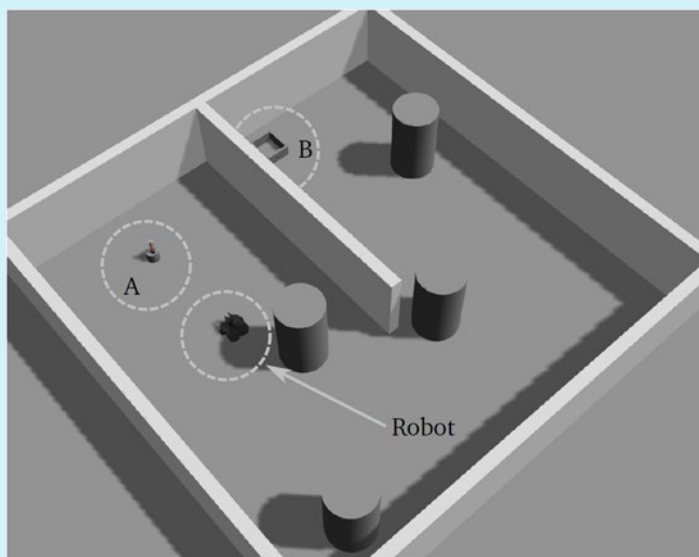


Abbildung 91: TurtleBot in der Gazebo-Simulationsumgebung: Der Roboter fährt zuerst zu Position A, nimmt das dort bereitgestellte Objekt auf und bringt dieses zu Position B. (Dengler 2019).

Demonstrator zur Absicherung mittels seitlich geführter Ultraschallsensoren

Standort: *FAPS*

Beteiligte Partner: *FAPS*, Mayser

Beteiligte Teilprojekte: TP 2, TP D

Von 2017 bis 2018 wurde untersucht, einen Knickarmroboter mittels seitlich geführter Ultraschallsensoren durch einen Vorhang abzusichern. Exemplarisch wurden die Untersuchungen an Robotern der Typen Stäubli TX60L sowie TX40 mit entsprechenden CS8C Steuerungen durchgeführt. Um die Kosten einer späteren Absicherung zu reduzieren wurde eine adaptive Sensorausrichtung untersucht. Situationsabhängig können die Sensoren gezielt bzgl. der Manipulatorstellung und der als nächstes auszuführenden Bewegung neu ausgerichtet werden.

Untersucht wurden der Einsatz von 3D-Kameras, PIR-Sensoren, Ultraschall sowie RADAR-Sensoren zur Menscherkennung im Umfeld der mobilen Plattform.

Teile der Untersuchungsergebnisse sowie die aus dem Sensoreinsatz gewonnenen Erfahrungen der Projektjahre 2017 und 2018 sind in das Absicherungskonzept der mobilen Plattform eingeflossen.



Abbildung 92: Links: Stäubli TX40; Rechts: Stäubli TX60L jeweils ausgestattet mit seitlich geführten Ultraschallsensoren

Demonstrator zur Navigation und Bahnplanung

Standort: *LIKE*

Beteiligte Partner: *LIKE*, Mayser

Beteiligte Teilprojekte: TP 2, TP D

Dieser Teildemonstrator wurde im Rahmen des ersten Projektjahres schwerpunktmäßig zur Untersuchung, Erarbeitung und Evaluierung verschiedener Navigationsalgorithmen sowie Bahnplanungs- und Ausweichstrategien für autonome Roboterplattformen herangezogen.

Im Rahmen des zweiten Projektjahres wurde die Sensorik der mobilen Plattform erweitert und speziell für die Fusion verschiedener Umgebungserfassungs-Sensoren genutzt (Kamera 2D/3D, LiDAR).

Weitere Gegenstände der mittels dieses Teildemonstrators durchgeführten Untersuchungen umfassten Umgebungsmodellierung und -interpretation, sowie die stochastische Charakterisierung der verwendeten Sensoren.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden geeignete Prinzipien (speziell hinsichtlich Umgebungserfassung und Mensch-Detektion) identifiziert, gemäß der Relevanz für den Use-Case ausgewählt und auf den Hauptdemonstrator übertragen.

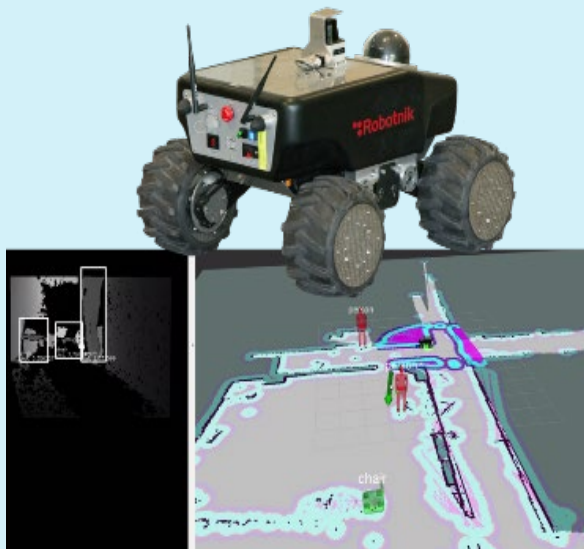


Abbildung 93: Roboterplattform zur Erfassung von Umgebungen

Demonstrator zur Werkzeugabsicherung

Standort: *FAPS*

Beteiligte Partner: *FAPS*

Beteiligte Teilprojekte: TP 2, TP 4, TP D

Basierend auf Ultraschallsensoren des Typs HCSR04 wurde im Projektjahr 2018 ein Ultraschallvorhang zur Werkzeugabsicherung untersucht. Die Auswertung der Sensoren erfolgt auf Microcontrollerbasis. Der Roboter UR10 wird via ROS gesteuert und führt eine einfache Pick-and-Place Aufgabe durch.

Ebenso Gegenstand der Untersuchung war in Zusammenarbeit zwischen TP 2, TP 4 und TP D ein intuitives Feedback (Rück-Kanal) an den Menschen basierend auf LED-Statusleuchten. Greift nun bspw. ein Mensch während des Prozesses in den Ultraschallvorhang, so wird zum einen der Roboter direkt über den entsprechenden Lichtschrankenkreis stillgesetzt. Nach Freigabe führt der Roboter seine Aufgabe fort. Der Überwachungsbereich des Ultraschallvorhangs lässt sich parametrisieren.



Abbildung 94: UR10 mit Ultraschallsensoren zur Werkzeugabsicherung

Demonstrator zur Kommissionierung

Standort: *FAPS*

Beteiligte Partner: Hefter, *FAPS*, MAN, Roboception

Beteiligte Teilprojekte: TP 2, TP 4, TP D

Seit Q4/2017 fokussiert der Bin-Picking Versuchsstand des LS FAPS in Kooperation der Teilprojekte TP 2, TP 4 und TP D die Use Case Bestandteile des Kommissionierens von Sichtlagerkisten, des fahrtbegleitenden Bin-Pickings und des Vormontierens sowie der teleoperierten Assistenz im Fehlerfall.

In Anlehnung an die mobile Plattform sowie an den Use Case werden an zwei stationären Yaskawa Robotersystemen HC10 und SIA10F Untersuchungen zur Objektlokalisierung, zur 6DoF-Poseschätzung sowie zum autonomen Greifen des Stückguts aus Sichtlagerkisten und dem anschließenden Fügen in definierter Pose erforscht. Darüber hinaus wurden am Versuchsstand Entwicklungen zur Anpassung der Yaskawa MotoROS-Packages als ein Teil der Integration in das FAPS Augmented Reality Teleoperationssystem durchgeführt.

Die Forschungsergebnisse konnten vollständig in den Gesamtdemonstrator, also die mobile Plattform, im Rahmen des Projektjahres 2019 / 20 eingießen.



Abbildung 95: Bin-Picking Versuchsstand am FAPS

Demonstrator zur Augmented Reality Teleoperation

Standort: *FAPS*

Beteiligte Partner: *FAPS*, Framatome

Beteiligte Teilprojekte: TP 2, TP 4, TP D

Basierend auf bestehenden Forschungsergebnissen der Projektpartner Framatome und FAPS entstand im Rahmen von FORobotics eine Augmented Reality Teleoperation autonomer Robotersysteme zu Fernwartungs- und Interventionszwecken. Das System ist in der Lage stationäre sowie mobil eingesetzte Knickarmroboter basierend auf VR-Hardware fernzusteuern und dient im Rahmen des Projekts als Fallback zur Intervention bei unerwartetem Systemverhalten der mobilen Plattform bzw. bei einem Scheitern des autonomen Greifens von Teilen.

Im Forschungsfokus standen unter anderem die Reduktion von Bandbreitenanforderungen sowie die Steigerung der Immersion. Hierzu wurden multiple stationäre und mitgeführte 3D-Kameras fusioniert, deren Datenströme segmentiert sowie mittels Objekterkennung und 6DoF-Poseschätzung weiterverarbeitet. Eine immersive Wahrnehmung wird durch das echtzeitnahe 3D-Rendering der aufgenommenen und verarbeiteten Daten der realen Umgebung erreicht.

Die Forschungsergebnisse konnten ebenso auf den Gesamtdemonstrator – die mobile Plattform – 2019 / 20 erfolgreich übertragen werden.



Abbildung 96: Augmented Reality Teleoperation Anwendung am FAPS

Demonstrator zur Planung und Steuerung

Standort: *Fraunhofer IGCV*

Beteiligte Partner: *Fraunhofer IGCV, UniA, S4P, SF*

Beteiligte Teilprojekte: TP 3, TP D

Zum Testen der Anwendungen, die in TP 3 entwickelt werden, wurde eine Softwarearchitektur für die Aufgabenorientierte Planung aufgebaut. Diese umfasst das Planungssystem des Partners software4production und die Steuerung in der IoT-Plattform Thingworx, die durch den Industriepartner Software Factory bereitgestellt wird. Ergänzt wird dies durch eine Anwendung zur Zuordnung der Ressourcen zu Jobs unter Berücksichtigung der Möglichkeiten, einen Job einem Team aus Ressourcen zuzuordnen.

Zwischen den einzelnen Systemen werden die Daten mittels Webservices, den sogenannten REST APIs, übertragen. Die REST-Architektur erfordert eine Client-Server-Modell, wobei in der entwickelten Softwarearchitektur das Planungsprogramm als Server fungiert. Für die Übertragung der Daten wird als Protokoll JSON verwendet. Mit Hilfe des eingesetzten Webservice werden die Daten per „GET-“, „POST-“ und „PUT-“ Befehl vom Server angefordert, an den Server übermittelt oder bestehende Daten auf dem Server geändert. Diese Architektur ermöglicht das Abrufen und Anreichern der Daten des Planungssystems und eine anschließende Übertragung an das Steuerungssystem Thingworx. Das Steuerungssystem erhält über die API die Daten zu den einzelnen Jobs der Aufträge und zum Status der Bearbeitung durch die Ressourcen.

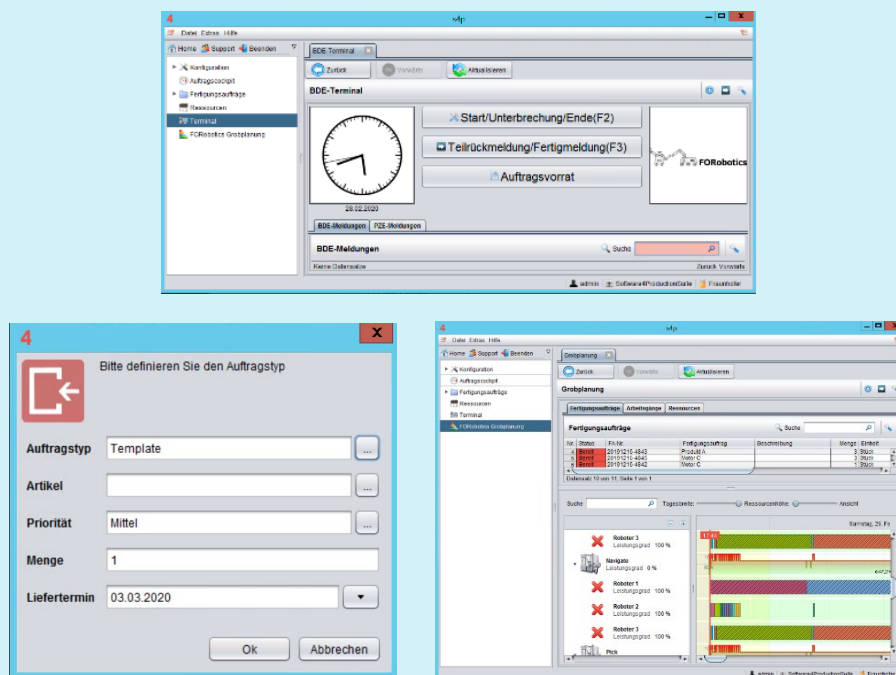


Abbildung 97: Oberfläche des Planungs- und Steuerungssystems

Demonstrator zur Playback-Programmierung

Standort: *Uni Bayreuth*

Beteiligte Partner: *Uni Bayreuth*

Beteiligte Teilprojekte: TP 4

Am Demonstrator der Universität Bayreuth wurde mit der editierbaren, sensorbasierten Playback-Programmierung ein Konzept entwickelt, welches es erlaubt einem Robotersystem per manuellem Führen intuitiv neue Programme beizubringen. Dazu wurde an einem Stäubli TX2-90L Industrieroboter zwischen Greifer und Flansch ein Kraft-Momenten-Sensor angebracht, der es erlaubt, den Roboter per Hand zu führen. Zusätzlich wurde eine Benutzeroberfläche entwickelt und evaluiert, welche es den Benutzer erlaubt, Roboterprogramme per Playback-Programmierung aufzuzeichnen und diese nachträglich zu editieren und mit sensorbasierten Wiederholungen und Alternativen zu erweitern.

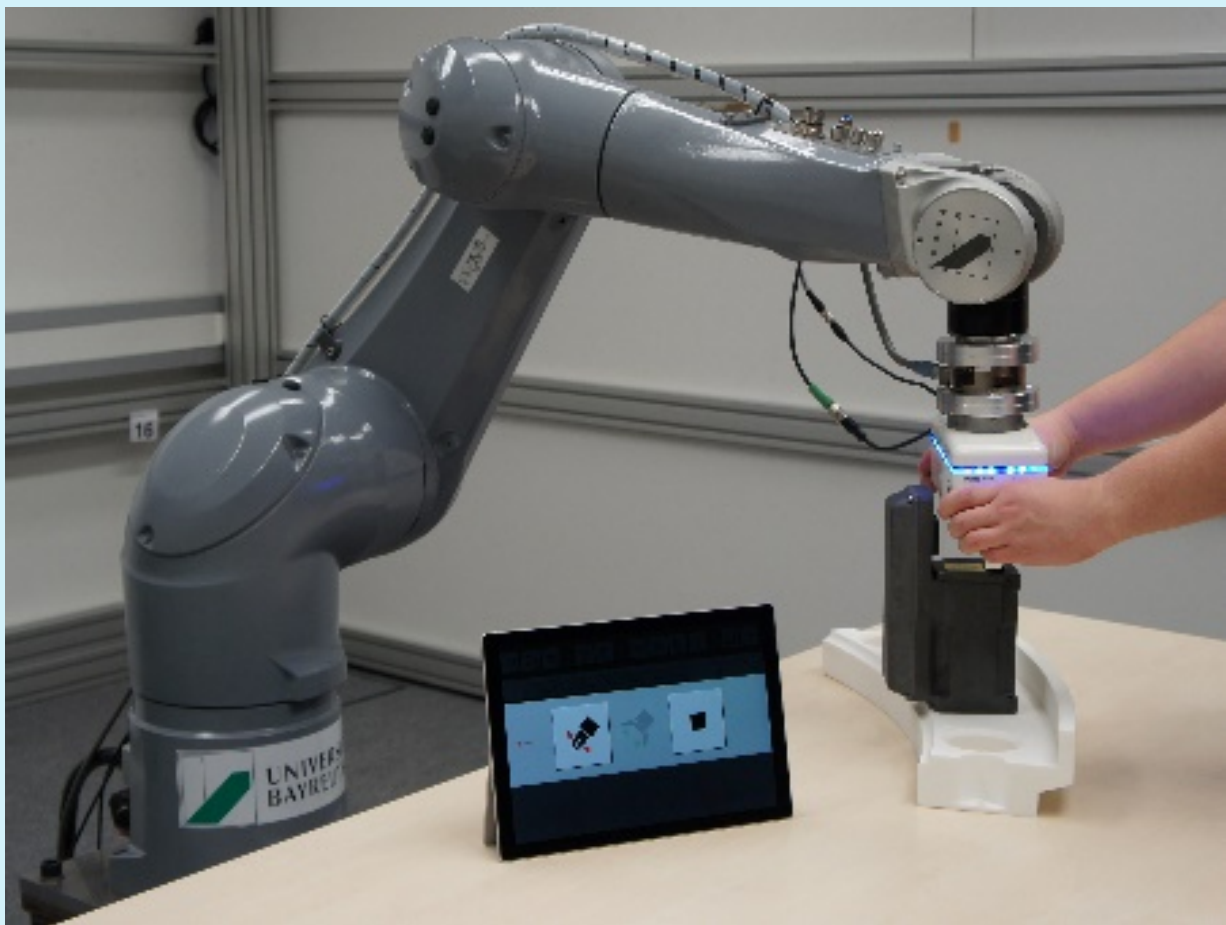


Abbildung 98: Stäubli TX2-90L mit Playback-Programmierung

Demonstrator zur multimodalen Interaktion

Standort: *Fraunhofer IGCV*

Beteiligte Partner: *Fraunhofer IGCV*

Beteiligte Teilprojekte: TP 4

Am Fraunhofer IGCV wurde an einer der beiden zur Verfügung stehenden Plattformen entsprechende Interaktionssysteme implementiert und evaluiert.

Hierfür wurde eine Gesten-, Augen- sowie Sprachsteuerung installiert. Als Ausgabemedium wird ein Taschenbeamer verwendet, um Informationen darzustellen.

Darüber hinaus stand diese Plattform im Testbed für die Versuche der Forschungspartner zur Verfügung. Hierbei wurden unter anderem Absicherungskonzepte validiert und Untersuchungen hinsichtlich Akzeptanz durchgeführt.



Abbildung 99: Mobiler Roboter mit Interaktionssystemen

Die zuvor beschriebenen Inhalte aus den Teil-Demonstratoren wurden in regelmäßig stattfindenden Arbeitstreffen in einen zentralen Demonstrator überführt. Abbildung 94 verdeutlicht das Zusammenspiel der Teildemonstratoren in den Gesamtdemonstrator.

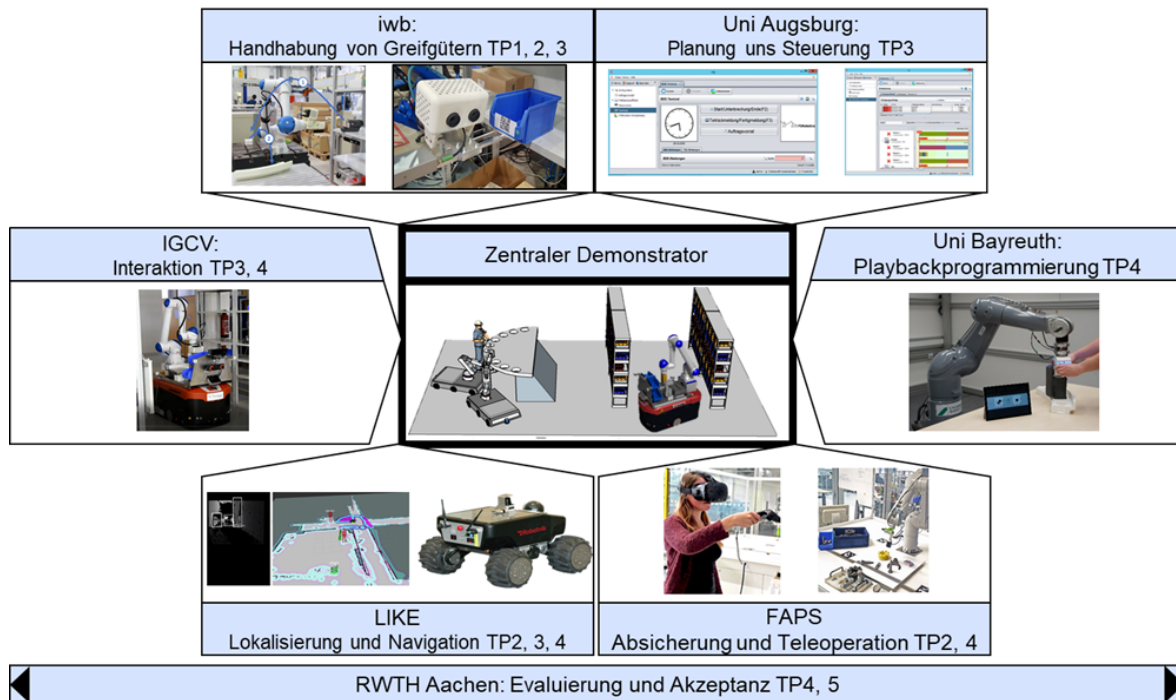


Abbildung 100: Übersicht und Zusammenspiel der Demonstratoren

Arbeitspaket D6: Umsetzung der jeweiligen Anwendungsfälle bei den Unternehmen

Um sowohl die einzelnen Anwendungsfälle des Use Cases als auch die in der Laborumgebung entwickelten Applikationen zu validieren, wurden Feldtests mit den mobilen Robotern bei den Anwendern durchgeführt. Diese werden im Folgenden genauer beschrieben.

Feldtest Kommissionierung: Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG

Wie zuvor angesprochen wurden im dritten Projektjahr Feldtests bei den Anwenderfirmen durchgeführt beziehungsweise werden aktuell zum Abschluss gebracht.

Der erste Feldtest wurde bei der Firma Mey Maschinenbau in Prien am Chiemsee umgesetzt. Hierbei wurde der Anwendungsfall der Kommissionierung erprobt, der von der Firma Mey Maschinenbau mit Hilfe mobiler Robotik adressiert wird. Das Aufgabenspektrum des mobilen Roboters sieht wie folgt aus:

- Navigation des mobilen Roboters in das Zentrallager und Einfahren in einen definierten Längergang mit verminderter Gangbreite
- Einmessen des Manipulators mit Hilfe eines Kamerasystems an einer entsprechenden Regalposition
- Handhabung von Schüttgutboxen mit entsprechendem Material
- Navigation zu einer Arbeitsstation und Anlieferung der Schüttgutboxen

■ Abholung von Schüttgutboxen an der Arbeitsstation und Transport ins Lager

Aufgrund einer Positionierengenauigkeit der Plattform wurde ein Kamerasystem am Greifer des Manipulators eingesetzt, um sich mit Hilfe einer Referenzmarke an der entsprechenden Lagerposition bzw. der Arbeitsstation zu referenzieren. So konnte der geringe Versatz der Plattform durch den Manipulator ausgeglichen werden und die Schüttgutboxen gegriffen werden.

In mehreren Vorabtreffen in Q2 und Q3 2019 wurden die Rahmenbedingungen für diesen Feldtest geschaffen. Ein zentraler Themenpunkt bei den Besprechungen war die Absicherung des mobilen Roboters. Hierfür wurden Gefährdungsanalyse durchgeführt und Lösungen erarbeitet.

Der Fokus der Gefährdungsanalysen richtete sich vor allem auf den Einsatz des mobilen Roboters im Lager, da hier die Gangbreiten nur ca. 1000 mm beträgt und der mobile Roboter eine Breite von ca. 700 mm besitzt. Beim Einfahren des Systems in den Lagergang ist somit der Durchgang für Werkskräfte blockiert (siehe Abbildung 97).

Da im Feldtest nur ein mobiles Robotersystem eingesetzt wurde, ist ein Einschließen von Personen im Lagergang nicht möglich und somit ist immer eine Seite des Gangs als Fluchtweg frei. Beim Einsatz mehrerer mobiler Systeme muss technisch gewährleistet werden, dass zwei mobile Roboter nur in den Gang einfahren können, wenn sich in diesem keine Person befindet. Für diesen Fall wurden etwaige Lösungen wie Lichtschranken o.ä. diskutiert, die aber für den Feldtest in FORobotics nicht notwendig sind.

Darüber hinaus wurden bei einer Begehung des Zentrallagers bei der Firma Mey Maschinenbau mögliche Hinterschnidungen im Lagergang identifiziert, in denen möglicherweise Personen durch den mobilen Roboter eingeschlossen werden könnten (siehe Abbildung 98). Diese wurden von der Firma Mey Maschinenbau verschlossen.

Darüber hinaus wurde die Route des mobilen Roboters so gewählt, dass im Fehlerfall keine Fluchtwege oder Brandschutztüren durch die Plattform blockiert wird. Für die Zeit des Feldtests im Lager wurde der mobile Roboter durch die Firma Mey Maschinenbau intern zertifiziert und die Werkskräfte im Lager entsprechend geschult.

Der Feldtest bei der Firma Mey Maschinenbau wurde in zwei Phasen durchgeführt. In Q3 2019 wurde die Plattform 6 Wochen eingesetzt und erste Funktionstests durchgeführt. Bei der Inbetriebnahme waren neben dem Fraunhofer IGCV die Firmen Grenzebach und Yaskawa bei der Einrichtung und Fehlerbeseitigung maßgeblich involviert. Der Feldtest wurde während der beiden Phasen durch die Firma Mey Maschinenbau begleitet und intensiv unterstützt.



Abbildung 101: Einsatz des mobilen Roboters im Lagergang bei der Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG

In der ersten Phase wurde Verbesserungspotential im Bereich der kamerabasierten Referenzierung festgestellt, da hier die Robustheit noch nicht ausreichend gewährleistet war, um die Schüttgut-

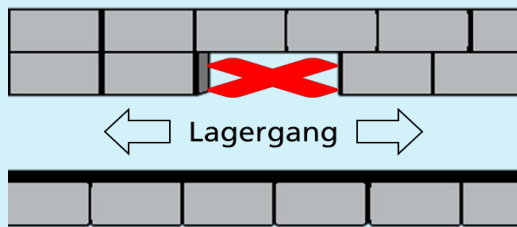


Abbildung 102: Hinterschneidungen im Lagergang

boxen prozesssicher zu greifen. Zusätzlich wurde festgestellt, dass für den realen Einsatz der Plattform die energetische Versorgung der Plattform noch optimiert werden muss, da ein Schichtbetrieb ohne Zwischenladung noch nicht möglich ist.

Die Plattform wurde Ende Q4 2019 bis Q1 2020 in der zweiten Phase bei der Firma Mey Maschinenbau eingesetzt, nachdem die identifizierten Schwachstellen behoben wurden (mit Ausnahme der energetischen Versorgung). Anfang Q1 2020 wurden durch die Firma Grenzebach die Batterien

getauscht, da aufgrund der hohen Beanspruchung der Batterien durch den Manipulator und weiterer Zusatzgeräte die Kapazität und somit die Laufzeit der Plattform rapide abnahm. Auch Zwischenladungen, die in den Prozess integriert wurden, konnten einen durchgängigen Betrieb der Plattform nicht aufrechterhalten. Nachdem die Batterien getauscht worden waren, konnte eine Laufzeit des mobilen Roboters mit Zwischenladungen von bis zu 9 Std erreicht werden. Eine Nachtschicht wurde aufgrund der Sicherheit bei der Firma Mey Maschinenbau nicht durchgeführt, da hier keine Personen im Fehlerfall anwesend gewesen wären.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Feldtest bei der Firma Mey Maschinenbau nach Behebung der anfänglich identifizierten Schwachstellen erfolgreich durchgeführt werden konnte und zum einen für den Forschungsverbund und zum anderen die Firma Mey Maschinenbau wesentliche Erkenntnisse im Umgang und im Einsatz mobiler Roboter hervorgebracht hat. Dank dem Einsatz der Firma Mey Maschinenbau konnten somit der mobile Roboter auf seine industrielle Einsatzfähigkeit getestet werden und für die Zukunft mögliches Entwicklungspotential aufgezeigt werden.

Folgende Erkenntnisse konnten aus dem Einsatz des mobilen Roboters bei der Firma Mey Maschinenbau gewonnen werden:

- Die Ansteuerung und Einrichtung des mobilen Roboters wird aktuell von der Firma Mey Maschinenbau noch als zu komplex beschrieben. Hierfür wurden im Forschungsverbund Lösungsansätze erarbeitet, wie die in TP 4 entwickelte Gesten- sowie Sprachsteuerung als auch eine Beamer-Ausgabe, die im nächsten Schritt in eine seriennahe Anwendung überführt werden sollen.
- Das kamerabasierte Referenzieren des mobilen Roboters ist als zielführend zu betrachten, um Ungenauigkeiten der Plattform reduzieren. Somit kann Komplexität beim Anfahren von Zielpositionen reduziert werden, da der Manipulator einen möglichen Versatz ausgleicht.
- Die Kombination aus dem Manipulator HC10 von Yaskawa und dem LS1200 von Grenzebach ist ebenfalls als positiv zu bewerten, da ein großer Arbeitsraum des Manipulators gegeben ist, der gerade im Lagerbereich erforderlich ist, um alle Regalböden zu bedienen. Darüber hinaus bietet die Plattform ausreichend Ablagemöglichkeiten und Traglast, um eine entsprechende Anzahl an Objekten zu transportieren.
- Als eine weitere große Herausforderung bei dieser Art des mobilen Roboters (Manipulator + ortsveränderliche Plattform) ist die Absicherung zu nennen. Hier wurde in verschiedenen Workshops Möglichkeiten diskutiert, um einen durchgängigen Schutz des gesamten Systems

zu garantieren, um für einen späteren realen Betrieb eine Zertifizierung nach Maschinenrichtlinie zu erhalten. Dazu ist der Einsatz weiterer technischer sowie organisatorischer Maßnahmen notwendig, um einen Parallelbetrieb zwischen Mensch und Maschine zu erhalten. Dazu wurden in Teilprojekt 2 Konzepte erarbeitet, die in Arbeitstreffen gemeinsam mit den Partnern des Verbunds diskutiert wurden.

- Um die Plattform im realen Betrieb wirtschaftlich einsetzen zu können, ist eine Verbesserung der Laufzeit der Plattform notwendig. Hierfür muss die energetische Versorgung der einzelnen Komponenten weiter optimiert werden, um eine ausreichend wirtschaftliche Laufzeit zu gewährleisten. Hierbei wurden entsprechende Verbraucher identifiziert und mögliche Lösungsstrategien zur Optimierung der energetischen Versorgung aufgezeigt. Als zielführender Schritt wurde für die nächste Verbesserungsstufe der Einsatz einer neuen, kompakteren Steuerungsgeneration des Manipulators identifiziert. Diese hat ein geringeres Gesamtgewicht und benötigt nach ersten Schätzungen weniger Energie als die aktuell verbaute Manipulator-Steuerung. In einem weiteren Schritt ist die Reduzierung von Transformationsstufen angedacht, um eine direkte Energieeinspeisung aus den Batterien in die Robotersteuerung zu bewirken. Somit kann die aktuelle Verlustleistung beim Transformieren deutlich reduziert werden und die Laufzeit somit gesteigert werden.

Feldtest Motormontage: Krones AG

Dieser Feldtest wird zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts aktuell noch durchgeführt.

Ursprünglich bestand das Ziel, die Feldtests bei den Firmen Mey Maschinenbau und Krones parallel durchzuführen, indem eine der beiden Forschungsplattformen bei der Firma Mey Maschinenbau eingesetzt wird und bei der Firma Krones die von Yaskawa aufgebaute Plattform verwendet werden sollte. Aufgrund technischer Schwierigkeiten wurde die Yaskawa-Plattform Q1 2020 mit einer neuen Steuerungsgeneration umgerüstet, um einen robusten Betrieb zu garantieren und zusätzlich energetisch zu optimieren.

Um die Motormontage im Rahmen eines Feldtests dennoch zu validieren, wurde die Forschungsplattform von der Firma Mey Maschinenbau nach Beendigung des Feldtests dort zu der Firma Krones verbracht.

Bei der Firma Krones wird der Use Case der Motormontage umgesetzt, indem die mobile Plattform Elektromotoren aus einem Lager holt und am Montagering einer Werkskraft zur Verfügung stellt. Da der Feldtest aktuell noch läuft, können zum Zeitpunkt der Berichterstattung noch keine Erkenntnisse beschrieben werden. Diese werden im Rahmen der Abschlussbegutachtung präsentiert.

Feldtest Fahrtbegleitende Vormontage: MAN SE

Dieser Use Case konnte im Rahmen des Projekts leider nicht im Feldtest erprobt werden, da die Firma MAN SE zurzeit keine kapazitiven Möglichkeiten zur Verfügung hat, den Use Case bei sich umzusetzen.

Aus diesem Grund wurde der Use Case im Technikum insbesondere am FAPS in Erlangen umgesetzt. Dabei wurden Bauteile, die im Rahmen der Vormontage in eine Setup-Platte eingesetzt werden, auf ihre Handhabungsfähigkeit überprüft. Exemplarisch für die fahrtbegleitende Vormontage wurden Schaltstangen ausgewählt, die ebenfalls in Schüttgutboxen gelagert werden. Der mobile Roboter entnimmt in diesem Use Case im Lager eine entsprechende Schüttgutbox und platziert diese auf seinem Bauchladen. Während der Fahrt findet daraufhin die Vormontage statt, indem der Manipulator mit Hilfe einer Kamera die Schaltstangen in der Schüttgutbox erkennt und

klassifiziert. Im nächsten Schritt werden die Schaltstangen aus der Schütte gegriffen und in die Setup-Platte eingelegt. Dieser Prozess findet während der Bewegung der Plattform statt und hat somit den Vorteil, dass die reine Transporttätigkeit somit in eine wertschöpfende Tätigkeit überführt wird. Die fertig bestückte Setup-Platte wird am Ende des Transports einer Werkkraft an einem Montagearbeitsplatz übergeben, die die Setup-Platte weiterverarbeitet.

Die Herausforderung in diesem Use Case Szenario besteht in der Bewegung des Manipulators während der Bewegung der Plattform. Vor dem normativen Hintergrund in Deutschland sind zwei sich überlagerte Bewegungen von Plattform und Manipulator noch nicht möglich. Im Forschungsverbundprojekt wurden Möglichkeiten konzeptioniert, wie diese zwei Bewegungen dennoch abgesichert werden können. Eine Möglichkeit hierbei ist der Einsatz einer kapazitiven Sensorhaut, die eine Kollision des Manipulators mit seiner Umgebung verhindert. Der Manipulator als solcher ist über seine Kraft- Drehmomentensensorik abgesichert, die allerdings auch empfindlich auf Unebenheiten im Boden reagieren. Somit wäre beim Überfahren der Plattform über eine Schwelle o.ä. ein Auslösen der Kraft- Drehmomentensensorik möglich, wenn sich der Manipulator während der Fahrt im kollaborierenden Modus bewegt. Durch den Einsatz einer kapazitiven Sensorhaut kann die Bewegung des Manipulators gegenüber dem Menschen weiterhin abgesichert werden, die Empfindlichkeit der Kraft- und Drehmomentensensorik allerdings reduziert werden.

Ferner wurde diskutiert, dass der Manipulator sich während der Bewegung der Plattform nur in den Grenzen der Plattform bewegen darf. Somit ist eine Kollision mit Objekten außerhalb der Plattform nicht möglich. Diese Begrenzung kann über die bereits vorhandene FSU (Sicherheitseinheit in der Yaskawa-Steuerung) abgedeckt werden. Eine dynamische Anpassung des Manipulator-Arbeitsraums ist darüber hinaus durch die Verwendung zusätzlicher seitlicher Sicherheitssensoren möglich. Hier wurden im Projekt bereits Ultraschallsensoren getestet, die die Plattform seitlich absichern. Mit Hilfe dieser Sensoren ist es möglich, den Arbeitsraum des Manipulators beim Einfahren der Plattform beispielsweise in einen engen Lagergang zu beschränken, um eine Kollision des Manipulators mit den Regalen zu verhindern. In Zusammenspiel mit den schon in der Plattform vorhandenen Sicherheitsscannern kann dadurch die Plattform vollständig abgesichert werden. Um allerdings eine fahrtbegleitende Vormontage im Serienbetrieb zu implementieren, müssen zunächst die normativen Herausforderungen gelöst werden.

Mit Hilfe der Laborversuche und durch den Austausch mit den Partnern im Forschungsverbundprojekt konnten für dieses Use Case Szenario somit praktikable technische Maßnahmen geschaffen werden und das Potential einer fahrtbegleitenden Manipulation aufgezeigt werden.

Testbed-Aufbau am Technologiezentrum in Augsburg

Um weiteren Partnern die Möglichkeit zu geben, die Potentialer mobiler Robotik zu zeigen, wurde im Technologiezentrum in Augsburg eine Versuchsfläche eingerichtet. Das Technologiezentrum in Augsburg bietet vielen Unternehmen und Forschungseinrichtungen die Möglichkeit sich zu vernetzen und in Technika Versuchsaufbauten zu erproben.

Im Testbed von FORobotics stand eine der beiden Forschungsplattformen für ständige Versuche einerseits durch Forschungs- als auch Industriepartnern zu Verfügung. Somit konnten auch weitere Partner für den Verbund gewonnen werden, die mit Hilfe des Testbeds Entwicklungen vorantreiben und Systeme anwendungsnah testen. Die Firma Locomotec GmbH beispielsweise führt in dem Testbed Untersuchungen im Bereich der Logistik mit Hilfe mobiler Robotik durch.

Darüber hinaus wurde das Testbed ebenfalls dazu verwendet, weitere Studien in Teilprojekt 5 durchzuführen. Dabei wurde untersucht, wie sich die Probanden, die im Lager arbeiten, fühlen, wenn neben ihnen ein mobiler Roboter arbeitet. Die Studie hat sich insbesondere mit dem Einfluss der Gangbreite auf den Gefühlszustand der Probanden beschäftigt (siehe Abbildung 103).

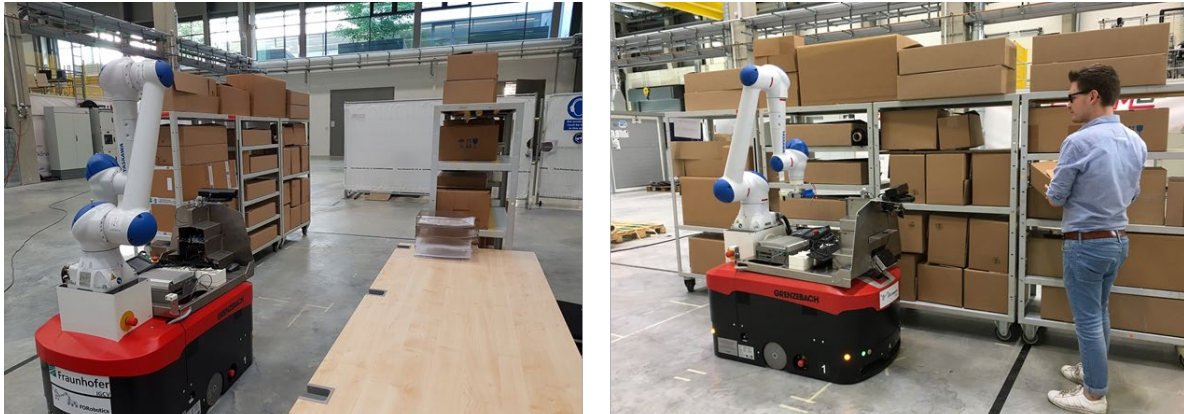


Abbildung 103: Testbed am Technologiezentrum in Augsburg

Da im Technologiezentrum regelmäßig Fachveranstaltungen stattfinden, konnte das Testbed zudem Interessenten auch anderer Industriezweige vorgeführt und Potentiale mobiler Robotik aufgezeigt werden.

4.6.4 Kooperationen mit anderen Teilprojekten

Da der Gesamtdemonstrator die Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte in einem gemeinsamen Use Case Szenario vereint, sind alle Teilprojekte an TP D beteiligt.

Kooperation mit Teilprojekt 1

TP 1 implementiert hierbei in die mobile Plattform einzelne Software-Module zum Ansteuern der Betriebsmittel und generiert die benötigten Schnittstellen für TP 2.

Kooperation mit Teilprojekt 2

Das Teilprojekt 2 ist für die Untersuchung und Integration der Sensorik zum Erfassen des Umfelds, des Menschen und zur Absicherung der mobilen Roboterplattform zuständig. Die aus den Sensoren gewonnenen Daten werden in TP 2 fusioniert und interpretiert.

Kooperation mit Teilprojekt 3

TP 3 ist für die Integration eines übergeordneten Planungs- und Steuerungssystems zuständig, das die Aufträge an die Plattform sendet und deren Ausführung überwacht.

Kooperation mit Teilprojekt 4

In Kooperation mit TP 4 werden die Interaktionssysteme in den Gesamtdemonstrator integriert, um eine Zusammenarbeit von Mensch und Plattform zu ermöglichen und die Nutzbarkeit der Interaktionssysteme aufzuzeigen.

Kooperation mit Teilprojekt 5

TP 5 evaluiert schließlich den aufgebauten Gesamtdemonstrator in Hinblick auf die Akzeptanz der mobilen Plattform und gibt nach der ersten Ausbaustufe Informationen über eine eventuelle Anpassung der einzelnen Systeme an die Teilprojekte zurück.

4.6.5 Veröffentlichungen

- Berg, Julia; Leichtmann, Benedikt; Lottermoser, Albrecht; Nitsch, Verena: Einsatz und Evaluation mobiler Roboter in Wt Werkstatttechnik online 9-2020, 2020. S.619.

4.6.6 Literaturverzeichnis

Baldauf, Moritz (2019): Entwicklung einer Methodik zur Identifizierung und Bewertung von Anwendungsfällen zur Mensch-Roboter-Interaktion in der Produktion. Masterarbeit. Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

Dengler, Sebastian (2019): Konzeption eines modularen Softwareframeworks zur aufgabenorientierten Steuerung autonomer mobiler Roboter. Masterarbeit. Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

Heuss, Lisa; Blank, Andreas; Dengler, Sebastian; Zikeli, Georg Lukas; Reinhart, Gunther; Franke, Jörg (2019): Modular Robot Software Framework for the Intelligent and Flexible Composition of Its Skills. In: Farhad Ameri, Kathryn E. Stecke, Gregor von Cieminski und Dimitris Kiritsis (Hg.): Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future, Bd. 566. Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 248–256.

Heuss, Lisa; Reinhart, Gunther (2020): Integration of Autonomous Task Planning into Reconfigurable Skill-Based Industrial Robots. In: 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Vienna, Austria: IEEE, S. 1293–1296.

Lehnert, Pascal (2017): Ontologie-basierte Methode zur Erzeugung von Digitalen Zwillingen für mobile Roboterplattformen in dienstbasierten, flexiblen Produktionsumgebungen. Masterarbeit. Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

Reinhart, Gunther; Henrich, Dominik; Berg, Julia (Hg.) (2017): 1. Zwischenbericht. FORobotics - Mobile, ad-hoc kooperierende Roboterteams.

Reinhart, Gunther; Henrich, Dominik; Berg, Julia (Hg.) (2018): 2. Zwischenbericht. FORobotics - Mobile, ad-hoc kooperierende Roboterteams.

Roder, Sebastian Quirin; Rothmeyer, Florian; Spiegelberger, Bernd; Reinhart, Gunther (2020): Development of a Shared Environment Model with Dynamic Trajectory Representation for Multiple Mobile Robots. In: Thorsten Schüppstuhl, Kirsten Tracht und Dominik Henrich (Hg.): Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 45–55.

Rothmeyer, Florian (2019): Entwicklung eines gemeinsamen Umweltmodells mit dynamischer Aktualisierung für mehrere mobile Roboter. Development of a Shared Environment Model with Dynamic Updating for Multiple Mobile Robots. Masterarbeit. Technische Universität München, Garching. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.

5 Bericht über Zusammenarbeit im Verbund

Julia Berger

5.1 Struktur der Zusammenarbeit

Zunächst erfolgte die Zusammenarbeit im Verbund innerhalb der Teilprojekte, in denen die inhaltlichen Arbeiten weiter definiert wurden. Jedoch wurde während der Projektarbeit nach kurzer Zeit erkannt, dass eine teilprojektübergreifende Arbeit notwendig ist, da die Themen der Teilprojekte stark voneinander abhängig sind. Daher wurde im ersten Projektjahr mit thematischen Kolloquien gestartet, die sich teilprojektübergreifend bestimmten Themen zuwendeten. Diese werden in Abschnitt 5.2 näher erläutert. Innerhalb des zweiten Projektjahres wurde ein Arbeitskreis der Anwender etabliert, der sich mit Fragestellungen, die vor allem die Anwender treffen, beschäftigte. Das dritte und vierte Jahr war geprägt von wissenschaftlicher Projektarbeit an Einzeldemonstratoren bei den Instituten, der Integration des Gesamtintegrators und der Evaluation der Roboterplattform bei den Anwendern. Abschnitt 5.1.1 beschreibt die Aufgaben der Projektpartner näher.

5.1.1 Zusammenarbeit im Verbund

Wie im zweiten Zwischenbericht dargelegt, können die Partner Themenbereichen zugeordnet werden, in denen sie hauptsächlich mitarbeiteten. Die Themenbereiche können, wie in der Abbildung 6 dargestellt, unterschieden werden in: Auftragseingang und –verarbeitung, User Interface, Teleoperation und Programmierung, Digitaler Zwilling, Mensch- und Objekterkennung, Navigation und Anwendung. Diese stärkere thematische Einbindung erfolgte vor allem ab dem 2. Projektjahr, als die Roboterplattform zur Verfügung stand.

Eine weitere Art der Strukturierung war im dritten Projektjahr die Unterscheidung zwischen Forschungsarbeiten und industrienaher Evaluation der Projektergebnisse. So war eine Plattform ab dem dritten Projektjahr für die Forschungsarbeiten vorgesehen und die zweite Plattform für die industrielle Evaluation des Einsatzes der Plattform bei den Anwendungspartnern. So wurde diese bei den Firmen Mey Maschinenbau und Krones evaluiert (siehe auch TP 5 und TP D). Die beiden Plattformen unterschieden sich dahingehend, dass die Forschungsplattform eine Vielzahl an zusätzlichen Komponenten, wie Interaktionstechnologien, zusätzliche Sensorik zur Navigation und zur Teleoperation enthielt und in ihrem Energieverbrauch noch nicht optimiert war, so dass ein Einsatz über einen längeren Zeitraum hinweg in einer industriellen Umgebung nicht möglich war.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass im Projekt eher thematisch als innerhalb einzelner Teilprojekte zusammengearbeitet wurde, da bei einigen Themen Schnittmengen zwischen den Teilprojekten vorlagen. Wie die Teilprojekte miteinander arbeiteten, wurde jeweils in den Beschreibungen der Teilprojekte festgehalten. Wie in Abbildung 6 dargestellt, wurden auch die Industriepartner eher thematisch als teilprojektweise in die Arbeiten einbezogen.

5.1.2 Einbindung Studierender

An den wissenschaftlichen Instituten als auch bei den industriellen Projektpartnern wurden die inhaltliche Erarbeitung der Ergebnisse durch studentische Arbeiten unterstützt. Im Projekt wurden insgesamt 134 studentische Arbeiten verfasst. Die nachfolgende Abbildung 104 zeigt eine Übersicht der Art der studentischen Arbeiten. Die Aufteilung der Arbeiten je Teilprojekt ist in nachfolgendem Diagramm dargestellt.

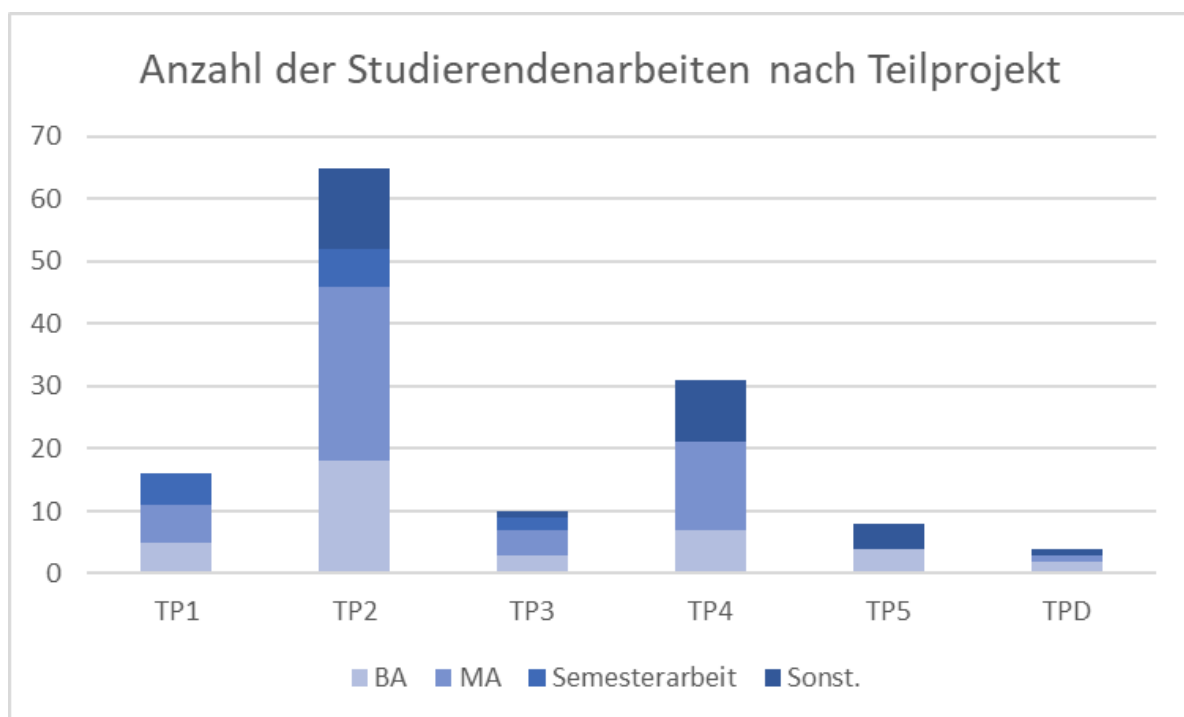


Abbildung 104: Auswertung der Studierendenarbeiten nach Teilprojekten

Es wurden Bachelor-, Master- und Semesterarbeiten verfasst. Weitere Arbeiten, wie Projektarbeiten oder Praktikum wurden unter sonstiges zusammengefasst. Die Anteile der unterschiedlichen Arten an der Gesamtanzahl zeigt folgendes Diagramm.

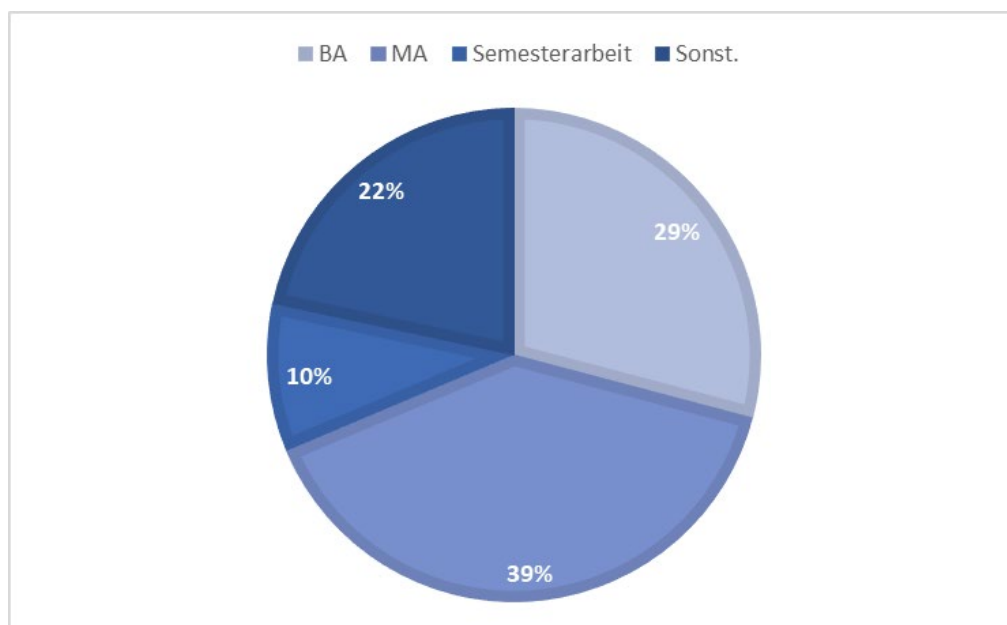


Abbildung 105: Anteile der Arten der Studierendenarbeiten

5.2 Thematische Kolloquien

Wie bereits in Abschnitt 5.1 erwähnt, fanden in den ersten beiden Jahren thematische Kolloquien statt, um Themen im Verbund zu diskutieren und Lösungsansätze zu erarbeiten. Ab dem dritten

Jahr lag der Schwerpunkt auf der Steigerung der Fähigkeiten des Robotersystems auf unterschiedlichen Ebenen, wie dem übergeordneten Planungssystem, den Greiffähigkeiten, den Interaktionstechnologien oder der Navigation. Diese „Kolloquien“ werden als Plattformintegration bezeichnet.

5.2.1 Themen der ersten beiden Jahre

Die thematischen Kolloquien in den ersten beiden Jahren betrachteten folgende Themen:

- Betriebsmittel und Dienste: In diesem Kolloquium wurde gemeinsam mit den Partnern die Kommunikationsarchitektur definiert.
- Arbeitssystemanalyse: An diesem Kolloquium waren vor allem die Anwenderfirmen (Krones AG, Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG und MAN) sowie Mayser beteiligt, um auf die Arbeitssystemanalyse vorbereitet zu werden.
- Absicherung: Bei diesem Kolloquium wurde mit ca. 35 Teilnehmenden aus Industrie und Forschung über die Absicherung des Robotersystems bei Umsetzung des betrachteten Use Cases diskutiert.
- Aufgabenorientierte Planung: Dieses Kolloquium diente zur Abstimmung des übergeordneten Planungssystems, das im Rahmen des Projekts aufgebaut werden sollte. Durch das Kolloquium konnten wertvolle Hinweise aus der Industrie in die Arbeit zu diesem Thema aufgenommen werden.
- Mensch-Roboter-Interaktion: Im Rahmen eines Workshops wurde in diesem Kolloquium erarbeitet, welche Informationen in den verschiedenen Phasen des Use Cases zwischen Mensch und Roboter ausgetauscht werden sollen. Daraus konnten die Technologien abgeleitet werden, die im Use Case Anwendung finden sollen und die Aufgaben verteilt werden.

Der Aufbau der thematischen Kolloquien war je Thema unterschiedlich. In einigen Kolloquien lag der Fokus mehr auf der Vorstellung der Themen und Integration von Hinweisen aus der Industrie. Andere Kolloquien waren als Workshop aufgebaut, wobei konkrete Fragestellungen bearbeitet und mögliche Lösungen diskutiert werden. Jedes Kolloquium bot eine wertvolle Plattform für den Austausch zwischen Industrie und Forschung.

5.2.2 Plattformintegration

Zum Thema der Plattformintegration wurden mehrere Workshops durchgeführt, in denen es um die steuerungstechnische Verbindung der Komponenten, das Flottenmanagement der Plattform oder die Steuerungsarchitektur des Gesamtsystems ging. Beteiligt hieran waren vor allem die Hersteller von Plattform und Roboter (Grenzebach und Yaskawa) sowie die Firmen, die Software für das übergeordnete Planungs- und Steuerungssystem aufbauen (SoftwareFactory und software4production).

5.2.3 Arbeitskreis der Anwender

Im Projekt galten die drei Firmen Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG, die Krones AG und MAN als Anwender, bei denen im ersten Projektjahr zunächst die Anwendungsfälle identifiziert wurden, aus denen der Use Case des Projekts erarbeitet wurde. Teilweise konnten diese Anwendungsfälle umgesetzt werden und im Rahmen der Evaluation erprobt werden. Für die drei Firmen ergaben sich mehrere übergreifende Fragestellungen, wie den wirtschaftlichen Nutzen der Plattform oder die Evaluation. Diese Fragestellungen wurden im Arbeitskreis der Anwender in Form von Workshops diskutiert. Die Ergebnisse dieser Workshops sind in TP 5 beschrieben. Zusammenfassend waren die Inhalte der Workshops in diesem Arbeitskreis der wirtschaftliche Nutzen, eine Nutzwertanalyse, mit der auch weitere Aspekte bewertet wurden und die Evaluation der Plattform vor Ort. Auch wurde ein Workshop zur Erarbeitung der Evaluationsformen im Rahmen des Projekts durchgeführt. So wurden folgende Evaluationsformen vorgeschlagen: Es konnte entweder eine

Evaluation bei den Anwendern selbst, also in deren Produktion, oder anhand eines Testbeds, das in Augsburg aufgebaut wurde, durchgeführt werden.

5.2.4 Evaluation bei den Anwendern

Nach 2,5 Projektjahren konnten bei den Anwendern Mey Maschinenbau und der Krones AG Evaluationen des Einsatzes der mobilen Roboterplattform stattfinden. Diese sind in TP 5 und TP D näher beschrieben. Bei Mey Maschinenbau wurde ein Anwendungsfall zur Kommissionierung von Schütten und bei der Krones AG die Montage der Motoren, wie sie auch im Use Case abgebildet ist, umgesetzt. Während der Evaluation führten die anwenden Firmen ein Tagebuch, um die Vorkommnisse des Tages aufzunehmen und anschließend strukturiert auswerden zu können. Durch den Einsatz der Roboterplattform im industriellen Umfeld konnten weitere Erkenntnisse zu den noch fehlenden Fähigkeiten der Robotersysteme erlangt werden, die es gilt, in folgenden Forschungsprojekten und teilweise durch die Umsetzung der Hersteller umzusetzen.

6 Bericht der Koordinierungsstelle

Die Koordinierungsstelle des Verbunds bzw. das Teilprojekt K ist mit der fachlichen Koordination, der internen Vernetzung und Informationsverteilung, der verwaltungstechnischen Abwicklung und der Öffentlichkeitsarbeit betraut und vertritt den Verbund nach außen. Die Tätigkeiten der Koordinierungsstelle über das Projekt hinweg werden in diesem Kapitel näher beschrieben.

6.1 Koordinierungsarbeiten im Verbund

Die interne Abstimmung unter den Wissenschaftlern im Forschungsverbund erfolgte in regelmäßigen Telefonkonferenzen und Abstimmungstreffen. Alle zwei Wochen fand eine Telefonkonferenz statt, in denen organisatorische Punkte, wie Finanzstatus, Kooperationsvertrag u. ä. als auch inhaltliche Punkte die Teilprojekte betreffend besprochen und diskutiert wurden. In diesem Jahr waren vor allem der Finanzstatus, zusammenhängend mit der verstärkten Einbindung der Partner und die Integration der Plattform Themen, die besprochen wurden. Die Treffen der wissenschaftlichen Mitarbeiter wurden in der zweiten Jahreshälfte nach Fertigstellung der Plattform auf einen monatlichen Rhythmus erhöht, um eine erfolgreiche Integration der Inhalte der einzelnen Teilprojekte zu ermöglichen. Hierbei werden auch die Veranstaltungen, wie Gesamttreffen, Kolloquien oder Arbeitskreise abgestimmt.

6.2 Öffentlichkeitsarbeit des Verbunds

Die Öffentlichkeitsarbeit, vertreten durch die Koordinierungsstelle, war für die Verbreitung der Projektergebnisse zuständig. Dafür wurden unterschiedliche Kanäle genutzt, die die Homepage, Veröffentlichungen, Demonstration auf Messen und Vorträge umfassten. Diese werden nachfolgend beschrieben.

6.2.1 Homepage

Die Homepage wurde aufgebaut, um Informationen über den Forschungsverbund zu verbreiten. Die Veröffentlichungen wurden gesammelt und aktuelle Informationen wurden verbreitet. Im dritten Projektjahr wurden Videos zu Ergebnissen des Forschungsprojekts in den Youtube-Kanal des Fraunhofer IGCV integriert und die Videos über die FORobotics-Website verbreitet. Des Weiteren wurde auf der Homepage auf das Testbed am Technologiezentrum Augsburg, das in TP D näher beschrieben wird, aufmerksam gemacht.

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Beitrag auf der Homepage, der auf das Video zur Mensch-Roboter-Interaktion hinweist.

18

Nov 19

Roboter-Mensch-Interaktion. Wie interagiert die mobile FORobotics Roboterplattform?

Im Rahmen von Teilprojekt 4 „Interaktion“ wurden verschiedene Interaktionsmöglichkeiten zwischen Mensch und Roboter untersucht. Dabei sind unterschiedliche Varianten zur Sprachsteuerung am Demonstrator implementiert worden.



Im Folgenden Video wird aufgezeigt, wie Mensch und Roboter miteinander kommunizieren können.

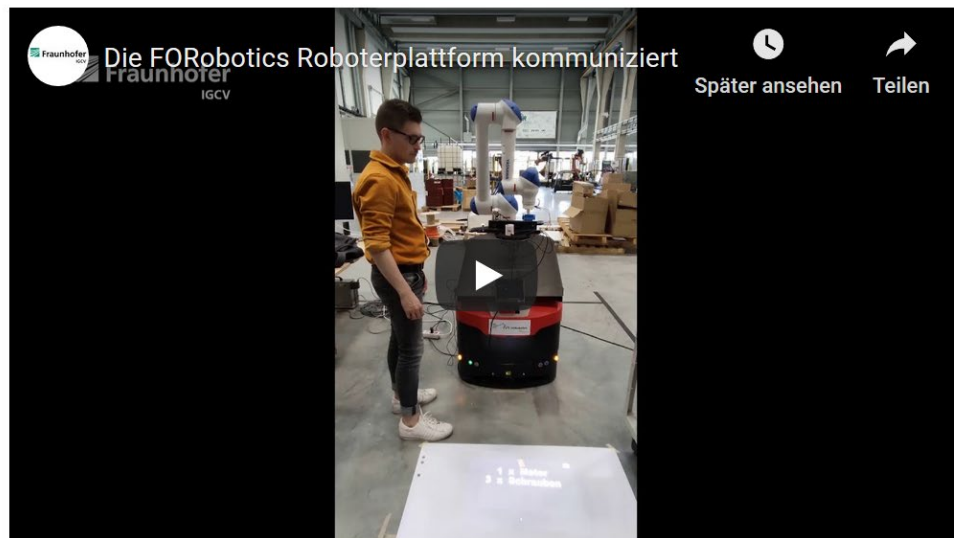


Abbildung 106: Ausschnitt aus der Homepage zum Verweis auf das Video zur Mensch-Roboter-Interaktion

6.2.2 Veröffentlichungen

Im Projekt FORobotics wurden Veröffentlichungen verfasst, um Projektergebnisse in die Öffentlichkeit zu tragen bzw. die Öffentlichkeit auf das Projekt aufmerksam zu machen. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Übersicht über die Veröffentlichungen innerhalb des Projekts.

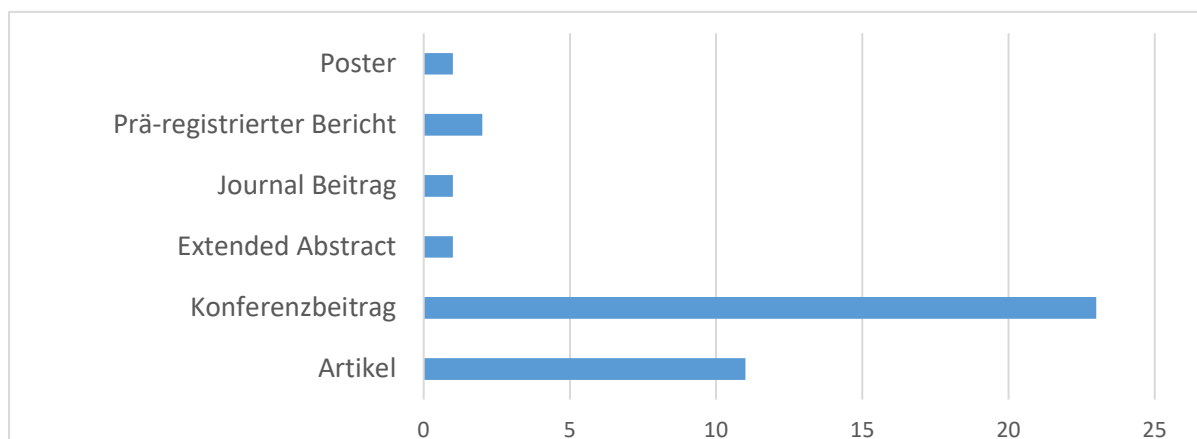


Abbildung 107: Übersicht über Art der Veröffentlichungen

6.2.3 Messen

Das Projekt FORobotics wurde auf Messen durch Demonstratoren dargestellt. In den ersten beiden Projektjahren wurde das Projekt in Form von Demonstratoren auf folgenden Messen präsentiert:

- **Hannover Messe 2018:** Mobiler Roboter des Fraunhofer IGCV ausgestattet mit Interaktionstechnologien
- **Automatica 2018:** Demonstrator zur Teleoperation eines stationären Roboters
- **RTO Innovation Summit 2018 (Brüssel):** Mobiler Roboter des Fraunhofer IGCV ausgestattet mit Interaktionstechnologien

Die Beteiligung an Messen des FORobotics-Projekts ab dem dritten Projektjahr wird in den nachfolgenden Abschnitten dargelegt.

6.2.3.1 Kongress des bayerischen Zukunftsrats (TechCheck München)

Basierend auf der Präsentation des mobilen Roboters auf der RTO Innovation Summit 2018 in Brüssel, wurde das Projekt angefragt, die mobile Plattform beim Kongress des bayerischen Zukunftsrats im Juli 2019 zu präsentieren. Dort wurde die Forschungsplattform des Projekts FORobotics mit seinen Interaktionstechnologien, wie Sprachsteuerung, Gestensteuerung und dem Projektor ausgestellt. Die Interaktionstechnologien konnten von den Besuchern erprobt werden.

6.2.3.2 TechCheck Augsburg

Anschließend an die Präsentation der Plattform beim TechCheck in München, wurde diese auch beim TechCheck in Augsburg im Oktober präsentiert. Dort wurde das Projekt FORobotics auch in einem kurzen Beitrag auf der Bühne vorgestellt.

6.2.3.3 Testbed im Technologiezentrum Augsburg

Im Technologiezentrum Augsburg wurde ein Testbed aufgebaut, bei dem der Demonstrator nachgestellt wurde und erprobt werden konnte. Es besteht aus der Forschungsplattform und einem Regallager, in dem die Kommissionierung stattfinden kann. Durch das Testbed kann das Projekt bei Publikumsverkehr eingesehen und damit der Öffentlichkeit bekannt gemacht werden.

6.2.3.4 Weitere Messeauftritte

Der mobile Roboter des Projekts fand auch bei anderen Unternehmen Anklang und es bestand Nachfrage, die Plattform auszustellen. So wurde die Plattform im Rahmen eines Demonstrators der Firma PKM Packaging und der Optima Consumer GmbH auf der Fachpack bzw. auf der Host Milano in Mailand präsentiert.

6.2.4 Vorträge auf Veranstaltungen

Das Projekt FORobotics wurde auf einigen Veranstaltungen durch Vorträge präsentiert. In den ersten beiden Jahren wurden folgende Vorträge zum Thema FORobotics gehalten:



Abbildung 108: Ausstellung der Plattform beim TechCheck in München

- Tea-Kongress Augsburg: „FORobotics- Mobile, ad-hoc kooperierende Roboterteams“, Julia Berg (Fraunhofer IGCV), Christian Herfert (Grenzbach)
- Robotik für die Smart Factory (VDI-Event): „Mensch-Roboter-Interaktion für mobile Roboterteams“, Julia Berg (Fraunhofer IGCV)
- FAPS Montageseminar: „Augmented Virtuality gestützte Teleoperation für den geplanten sowie intervenierenden Operatorzugriff auf stationäre und mobile Robotersysteme“, Andreas Blank (FAPS, Erlangen)
- RWTH Wissenschaftsnacht: „Schöne neue Arbeitswelt? Chancen und Herausforderungen für Unternehmen und Arbeitskräfte“, Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch (RWTH Aachen)
- HR Summit 2019: Podiumsdiskussion: „Transformation von Konzerneinheiten in agile Organisationen – wie sieht die Arbeitswelt von morgen in etablierten Organisation aus?“, Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch (RWTH Aachen)

6.2.4.1 Tea-Kongress Augsburg

Beim Technologietransfer-Kongress in Augsburg im März wurde das Projekt FORobotics in Form eines Demonstrators bei den Führungen vorgestellt. Die mobile Roboterplattform wurde mit seinen Interaktionstechnologien ausgestellt. Des Weiteren wurde auf einem Bildschirm ein Video des Anwendungsfalls präsentiert.

6.2.4.2 Vortrag bei Marcus Evans

Im Rahmen des Events „Intelligente vernetzte Robotik“ im September 2020 wurden Ergebnisse des Projekts, insbesondere diese zur Mensch-Roboter-Interaktion, innerhalb eines Vortrags den anwesenden Personen präsentiert.

6.2.5 Tagung mobile Robotik

Im Juli 2019 fand die erste Tagung zur mobilen Robotik, veranstaltet durch die IHK Schwaben in Zusammenarbeit mit dem Projekt FORobotics, in den Räumen der IHK Schwaben statt. Zunächst wurde die Veranstaltung mit einem Save-the-Date-Flyer angekündigt, bevor das Programm versendet wurde. Das Programm beinhaltete Vorträge von hauptsächlich den Projektpartnern. Es gab Vorträge zu den Technologien, wie von Grenzbach, Yaskawa oder Stäubli, aber auch zur Anwendung von Mey Maschinenbau Prien GmbH & Co. KG. Neben den Vorträgen durch die Industrie, wurde eine Session veranstaltet, in denen die Wissenschaftler ihre Forschungsthemen im Projekt FORobotics vorstellten. Das Programm zeigt die nachfolgende Abbildung. Die Tagung konnte mit ca. 100 Besuchern eine angemessene Besucherzahl verzeichnen. Die Hauptorganisation wurde durch die IHK Schwaben übernommen. Diese gestaltete die Flyer (Save-the-Date, Einladung), verteilte die Einladungen an ihre Kontakte und war für die Räumlichkeit und Versorgung der Gäste zuständig. Der Erfolg dieser Tagung führt zu einer weiteren Auflage im Jahr 2020.

PROGRAMM

| | | | |
|-----------|--|-----------|--|
| 9:00 Uhr | Check in | 12:45 Uhr | Scientist Pitches Wissenschaftler aus dem Projektverbund stellen sich und ihr Forschungsgebiet kurz vor |
| 9:30 Uhr | Begrüßung Dr. Matthias Köppel Leiter Standortpolitik, IHK Schwaben | 13:45 Uhr | HelMO – Mobile Robotersystem als Bindeglied der smarten Produktion Alexander Braun , Stäubli Tec-Systems GmbH Robotics |
| 9:45 Uhr | Mobile Robotik für die Industrie Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart , Fraunhofer IGC | 14:15 Uhr | Kaffee und Netzwerk |
| 10:15 Uhr | FORobotics – mobile, ad-hoc kooperierende Roboterteams Julia Berg , Fraunhofer IGC | 14:45 Uhr | Mensch-Roboter-Kollaboration und mobile Plattformen Single-, Flotten- und Team-Lösungen Peter Gmeiner , Kuka AG |
| 10:45 Uhr | Mobile Robotik – Ein steiniger Weg bis zur industriellen Umsetzung Christian Herfert Grenzbach Maschinenbau GmbH | 15:15 Uhr | Absicherung mobiler Roboter Andreas Blank , FAPS, Universität Erlangen-Nürnberg und Mayser GmbH Et Co. KG |
| 11:15 Uhr | Roboter in der Industrie – Kollaboration, Mobilität und Kommunikation Dr. Michael Klos , Yaskawa Europe GmbH | 15:45 Uhr | Mobile Roboterteams in der Kommissionierung – innerhalb und außerhalb der Industrie Josef Guggenberger , Hefter Maschinenbau GmbH |
| 11:45 Uhr | Mittagsimbiss im Ausstellerforum | 16:15 Uhr | Diskussionsforum – Sie fragen, wir antworten |
| | | 17:00 Uhr | Get together |

Abbildung 109: Programm der Tagung "FORobotics"



Abbildung 110: Vertreter und mobiler Roboter des Forschungsverbunds FORobotics bei der Tagung (v.l. Dr. Michael Klos (Yaskawa Europe GmbH), Prof. Gunther Reinhart (TU München und Fraunhofer IGC), Christian Herfert (Grenz-
bach Maschinenbau GmbH), Julia Berg (Fraunhofer IGC), Dr. Matthias Köppel (IHK Schwaben))

7 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend wird in den nachfolgenden beiden Abschnitten zunächst eine Zusammenfassung und eine Bewertung der Arbeiten des Projekts zu Projektende gegeben. Hierbei wird allgemein auf das Projekt eingegangen und jeweils eine Zusammenfassung der Arbeiten der einzelnen Teilprojekte beschrieben. Im Abschnitt 7.2 werden Forschungsfragen beschrieben, die aus den Ergebnissen des Projekts abgeleitet wurden, jedoch nicht mehr im Rahmen des Projekts FORobotics bearbeitet werden konnten.

7.1 Bewertung der Arbeiten zu Projektende

Das Forschungsverbundprojekt FORobotics setzte sich zum Ziel, mobile Roboterteams zu betrachten, die ad-hoc kooperieren können. Dabei kann ein Team aus mehreren Robotern oder aus Roboter und Mensch bestehen. Dazu wurden sechs unterschiedliche Teilprojekte ausgebildet, die sich mit den Themen in diesem Bereich beschäftigen. Diese umfassten die Beschreibung der Betriebsmittel, die sensorische Umfelderkennung und Absicherung, ein übergeordnetes Planungs- und Steuerungssystem und die Fähigkeit zur Interaktion des Roboters mit dem Menschen. Des Weiteren gab es ein Teilprojekt zur arbeitswissenschaftlichen Untersuchung der erarbeiteten Aspekte, das Nutzerstudien und Evaluationen durchführte. In einem sechsten Teilprojekt wurden die Einzelvorhaben in einem gemeinsamen Demonstrator in Verbindung gesetzt und prototypisch implementiert. Der gemeinsame Use Case basierte auf Anwendungsfällen von Industriepartnern, die im Rahmen einer Arbeitssystemanalyse identifiziert wurden. Innerhalb des Forschungsverbundprojekts wurde erkannt, dass die Themen der Teilprojekte stark miteinander verbunden sind, so dass eine weitestgehend entkoppelte Arbeit der Teilprojekte nicht möglich war. Daher arbeiteten die Teilprojekte an den Schnittstellen zusammen. Die zentralen Ergebnisse der Teilprojekte umfassen:

- **Teilprojekt 1:** Der in TP 1 gewählte dienstbasierte Ansatz zum Aufbau der Roboterarchitektur ermöglicht die freie Konfiguration der Fähigkeiten des Roboters sowie flexible Kombination dieser zur Bearbeitung vielfältiger Produktionsaufgaben. Wurden innerhalb von FORobotics die Aufgaben zentral durch das übergeordnete PPS-System geplant und den mobilen Robotern zur Ausführung übergeben, sollten in zukünftigen Forschungsarbeiten die Möglichkeiten zur Steigerung der Autonomie der Roboter untersucht werden, sodass diese notwendigen Aktionen zur Bearbeitung der ihnen übergebenen Aufgaben selbstständig planen, veränderte Randbedingungen oder Störgrößen erkennen und zielgerichtet auf diese reagieren.
- **Teilprojekt 2:** Das Teilprojekt TP 2 untersuchte und erschloss im Forschungsprojekt Teile wesentlicher für mobile Roboter(teams) erforderlicher autonomer Fähigkeiten sowie wurden hierfür notwendige Forschungsfragen zur sensorischen Wahrnehmung, zur Sensordatenfusion, zur Zusammenführung derselben zu einer lokalen Plattform-Umweltmodellierung adressiert. Auch erschloss das TP Teile von für die Autonomie erforderlicher Fähigkeiten im Bereich der Navigation und der Trajektorienplanung. Darüber hinaus konnten Absicherungskonzepte für mobile Roboter entwickelt, evaluiert sowie in Teilen am Gesamtdemonstrator erfolgreich umgesetzt und erprobt werden. Ebenso wurden im Rahmen des TP kombinierte Vernetzungs- und Kommunikationsweisen, mit Nutzung innovativer Roboterframeworks (wie ROS), bei gleichzeitiger Einhaltung von Industriestandards (wie OPC UA) für heterogene, verteilte Systeme entwickelt und erprobt. Die bereitgestellten autonomen Fähigkeiten dienen im Use Case der Erkennung, Lokalisierung und Poseschätzung von Objekten und Menschen, der Umweltmodellierung und hiervon abgeleitet der intelligenten lokalen Navigation der Plattform sowie der Trajektorienplanung der eingesetzten Manipulatoren. Die Forschungsarbeiten berücksichtigten dabei sowohl einzelne mobile Robotersysteme als auch insbesondere die in FORobotics

adressierten Mensch-Roboter- und Roboter-Roboter-Teamkonstellationen. Die FuE-Ergebnisse flossen in weiten Teilen in die Umsetzung des Gesamtdemonstrators ein und wurden entlang der einzelnen Use Case Szenarien anwendungsnah bewertet.

- **Teilprojekt 3:** Zentrales Ergebnis des dritten Teilprojekts ist die Befähigung der Aufgabenorientierten Planung zum Einplanen von Teams, ohne dass dies vorab bereits in der Zuordnung von Aufträgen zu Ressourcen festgelegt wurde. Damit dies umgesetzt werden kann, wurde die Darstellung von Jobs mit Unterteilung in Aufgaben als Planungselement erarbeitet, um zusammen mit einer erweiterten Fähigkeitenbeschreibung der Ressourcen einen Anforderungen-Fähigkeiten-abgleich durchführen zu können. Werkkräfte sind hier ebenfalls integriert. Somit ist es möglich, flexibel und dynamisch Aufträge durch Ressourcen ausführen zu lassen, Rückmeldungen zu verarbeiten und das Produktionsprogramm entsprechend zu erstellen und anzupassen. Außerdem wurden Möglichkeiten zur globalen Bahnplanung für die Navigation der mobilen Ressourcen erarbeitet.
- **Teilprojekt 4:** Das Teilprojekt 4 stellte sich der Herausforderung, Möglichkeiten zur Kommunikation zwischen Mensch und Roboter zur Verfügung zu stellen, sodass eine Mensch-Roboter-Interaktion ermöglicht wird. So wurden unterschiedliche Modalitäten zur Eingabe von Informationen, wie z.B. über Gesten, Sprache oder einem Display, untersucht und teilweise implementiert. Zur Ausgabe von Informationen wurde die Anzeige auf dem Boden mit Hilfe eines Projektors entwickelt und um mehr Informationen darstellen zu können, die Anzeige über ein Display. Über die verschiedenen Modalitäten kann der Mensch eine ad-hoc Anfrage zu dem Robotersystem stellen. Des Weiteren wurde an einem Programmiersystem gearbeitet, mit Hilfe dessen das Roboterprogramm aufgenommen werden kann, beispielsweise für den Fall, dass nicht genügend Informationen zur automatischen Generierung zur Verfügung stehen. Für mögliche Haverie-Szenarien der Plattform wurde außerdem die Eignung einer Augmented Virtuality Teleoperation untersucht. Dabei wird ein Teleoperator eingebunden, der das System mit Hilfe eines Controllers fernsteuern und damit dem System beispielsweise bei Fehlschlägen eines Greifvorgangs aus dieser Situation helfen kann. Das Robotersystem verfügte zu Beginn des Projekts über keine Fähigkeiten, die es ihm erlauben, zu identifizieren, ob ein Mensch in der Umgebung ist und welche Tätigkeiten dieser durchführt. Da jedoch in einem Regallager ein Mensch den Roboter nicht bemerken oder aber im Weg stehen könnte, wurden Methoden zur Erfassung des Menschen und dessen aktueller Tätigkeit erarbeitet. Damit wird der Mensch zunächst grob erfasst und kamerabasiert werden seine Bewegungen analysiert.
- **Teilprojekt 5:** Die Untersuchungen zeigten konstant, dass die Betrachtung der Usability und des Roboter-Designs nur einen Teil der Nutzerakzeptanz ausmachten. So zeigten zwei Studien, dass die Erfahrung mit der Technologie zu einem besseren Verständnis beitragen konnte. Für eine erfolgreiche Implementierung und Interaktion muss weiterhin eine ganzheitliche Betrachtung des Arbeitssystems erfolgen. So konnte u.a. gezeigt werden, dass die Einführung einer Plattform auch soziale Folgen hat (z.B. befürchteter Verlust des menschlichen Miteinanders am Arbeitsplatz). Diese sollten von den Unternehmen für eine angemessene Akzeptanz bei den Werkkräften mitberücksichtigt und präventiv bearbeitet werden.
- In **Teilprojekt D** wurden die Einzeldemonstratoren aus den Teilprojekten zusammengefasst und in den zentralen Use Case überführt. Hierzu wurden zu Beginn des Projekts Arbeitssystemanalysen bei den Anwendern MAN, Krones und Mey Maschinenbau durchgeführt. Daraus wurde ein Use Case Szenario erstellt, dass die Bereiche Kommissionierung, fahrtbegleitende Vormontage und eine Teamaufgabe beinhaltet. Diese Bereiche konnten in der ersten und zweiten Ausbaustufe dargestellt werden und die Funktionsfähigkeit evaluiert werden. Zusätzlich wurden bei den Anwenderfirmen Feldtests durchgeführt und die Systeme vor Ort getestet. Diese Feldtests konnte sowohl das große Potential, das durch den Einsatz mobiler

Roboter möglich ist, aufgezeigt als auch in verschiedenen Workshops potentielle Einsatzgebiete und Weiterentwicklungen diskutiert werden.

Vor dem dritten Projektjahr wurde festgestellt, dass die Arbeiten ab dem dritten Projektjahr aufgeteilt werden sollten: Die Forschungsarbeiten fanden an einem der mobilen Roboter, ausgestattet mit diversen Komponenten statt; mit der zweiten mobilen Roboterplattform wurden Evaluationen bei den Anwendern durchgeführt, um weitere Erkenntnisse zu sammeln, welche Forschungsaspekte in Zukunft weiter untersucht werden müssen.

Insgesamt ist festzustellen, dass die geplanten inhaltlichen Arbeiten des Projekts weitestgehend abgeschlossen werden konnten. Während der Projektlaufzeit kam es dennoch zu inhaltlichen Verschiebungen aufgrund von vorheriger Ergebnisse oder dem Input der industriellen Partner. So wurde beispielsweise das Thema der Absicherung verstärkt betrachtet, obwohl es zum Zeitpunkt der Antragsstellung nur ein Randthema abbildete. Durch die enge Verknüpfung zwischen Forschung und Industrie konnten so für beide Partner wertvolle Ergänzungen unternommen werden.

Die in diesem Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse bilden eine gute Basis für weitere Arbeiten zum Thema mobile Roboter(teams). So wurden an einigen Stellen Erkenntnisse erarbeitet, die jedoch noch weiteren Forschungsbedarf hervorriefen. Außerdem wurden weitere Fragestellungen aufgedeckt. Diese sind in Abschnitt 7.2 beschrieben.

7.2 Ausblick

Aus den Arbeiten im Forschungsverbundprojekt ergeben sich weiterführende Fragestellungen, auf die nachfolgend kurz eingegangen wird.

- Der in TP 1 gewählte dienstbasierte Ansatz zum Aufbau der Roboterarchitektur ermöglicht die freie Konfiguration der Fähigkeiten des Roboters sowie flexible Kombination dieser zur Bearbeitung vielfältiger Produktionsaufgaben. Wurden innerhalb von FORobotics die Aufgaben zentral durch das übergeordnete PPS-System geplant und den mobilen Robotern zur Ausführung übergeben, sollten in zukünftigen Forschungsarbeiten die Möglichkeiten zur Steigerung der Autonomie der Roboter untersucht werden, sodass diese notwendige Aktionen zur Bearbeitung der ihnen übergebenen Aufgaben selbstständig planen, veränderte Randbedingungen oder Störgrößen erkennen und zielgerichtet auf diese reagieren.
- Die aus dem Projekt ableitbaren Fragestellungen des TP 2 sind folgend dargestellt. Zu diesen gehören zunächst sich ergebende Potenziale durch Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens, zur schnelleren und zuverlässigeren Beschreibung der Umgebung auf Basis der verschiedenen Wahrnehmungskanäle. Ebenso müssen sich ergebende Potenziale dieser Technologien im Bereich der Absicherung von Robotern sowie der Mensch-Roboter-Kollaboration vertieft betrachtet werden. Hierzu gehören Fragestellungen, inwieweit bisher nicht normgerecht zertifizierbare KI-Verfahren in Kombination mit zertifizierter, sicherer Technik weitere Wirtschaftlichkeitspotenziale durch Reduktion von Stillstandzeiten heben kann. Welche Konfidenzraten lassen sich hier erreichen und inwieweit lassen sich solche innovativen Verfahren der Sensordatenverarbeitung künftig normgerecht zertifizieren oder wie sollten Normen künftig angepasst werden um deren Einsatz zu ermöglichen. Welche Potenziale und Akzeptanz für den industriellen Einsatz von intelligenten Robotersystemen mit autonomen Fähigkeiten bietet der Einsatz von ROS2 mit seinen deterministischen, echtzeitfähigen Elementen? Eine weitere Forschungsfrage betrifft die im Projektzeitrahmen nicht vollständig abgeschlossene Betrachtung einer kombinierten Bewegungsplanung multipler mobiler Robotersysteme im Team. Hier sind insbesondere Hardware-nahe Erprobungen in einem industriellen Umfeld erforderlich, um die in Theorie und Simulationen erarbeiteten Konzepte bewerten zu können.

- Im Bereich der Aufgabenorientierten Planung zeigte sich weiterer Forschungsbedarf bezüglich der Erweiterung der Aufgaben für die im Produktionsbereich anfallenden Jobs mit weiteren Ressourcen wie bspw. Werkzeugmaschinen und Prüfgeräten und ebenfalls für komplexere Produkte. Die bezüglich des AI-Planers angesprochenen Aspekte der automatisierten Ableitung von Aufgabensequenzen und die Integration in das Planungssystem sind als zukünftige Erweiterungen zu nennen. Außerdem ist die Kommunikation mit den verschiedenen Ressourcen bezüglich Plug & Play- Eigenschaften und echtzeitnahem, flexiblem Datenaustausch als relevanter zukünftiger Forschungsaspekt identifiziert worden. In diesem Kontext steht eine tiefergehende Untersuchung bezüglich der dynamischen Anpassung von verfügbaren Ressourcen und damit des Produktionsprogramms noch aus.
- Fragestellungen aus dem Teilprojekt 4 zur Mensch-Roboter-Interaktion umfassen: Wie kann ein Gesamtkonzept für einen Interaktionsdialog aussehen, der auf eine Situation angepasst reagiert? Es ist zu erforschen, ob unterschiedliche Menschen, in bestimmten Situationen eher gleiche oder andere Interaktionstechnologien verwenden möchten, um mit dem Robotersystem kommunizieren zu können. Außerdem besteht die Fragestellung, die nicht vollumfänglich innerhalb des Projekts erforscht werden konnte, auf welcher Abstraktionsebene die Eingaben durch den Menschen erfolgen sollten. Es stellt eine große Herausforderung dar, die vielen unterschiedlichen komplexen Aufgaben innerhalb einer Produktion zu erfassen und mit Hilfe der Interaktionssysteme abbilden zu können, sodass sie für Nicht-Experten verständlich, jedoch auch nicht zu vereinfacht abgebildet sind. Dieses Level gilt es, in einer Untersuchung zu bestimmen. Hinsichtlich der Teleoperation stellt insbesondere die Erweiterung auf die gesamte mobile Einheit einen Forschungsaspekt dar. Hierzu ist neben einer Möglichkeit zur direkten Steuerung der Plattformantriebe selbst, die echtzeitnahe und möglichst bandbreiten-optimierte Modellierung der vollständigen Umgebungserfassung innerhalb der AV ein Forschungsziel. Zur besseren multimodalen Operatoreinbindung avisiert darüber hinaus der Einsatz von Teleoperationshandschuhen weiteres Verbesserungspotenzial als Rück-Kanal. Ein weiterer innovativer Forschungsansatz bei der Teleoperation ist das Mitlernen des Systems von den Operatoreingaben auf Basis von Imitation Learning. Im Bereich der Playbackprogrammierung stellt sich die Frage, inwiefern das sensorbasierte, editierbare Playback-Programmierungskonzept für (quasi) stationäre Mehrrobotersysteme auch auf mobile Robotersysteme bzw. fahrerlose Transportsysteme übertragbar ist.
- Aus dem Teilprojekt 5, in dessen Fokus der Mensch und dahingehend die Nutzbarkeit des Systems stand, können folgende Forschungsfragen abgeleitet werden: Wie groß ist der Einfluss weiterer Umgebungsfaktoren in industriellen Settings auf den Wohlfühlabstand gegenüber mobilen Robotern wie beispielsweise Lärm, Verschmutzung, die Anwesenheit multipler Technologien oder eine Kombination daraus? Wie müssen multiple Interaktionskanäle und -möglichkeiten koordiniert sein, ohne zur Reizüberlastung zu führen, vor allem unter Betrachtung im Längsschnitt und in Szenarien mit multiplen Technologien?
- Durch die Arbeiten am Demonstrator sowie durch die Feldtests konnten weitere Fragestellungen im Umgang mit mobilen Robotersystemen aufgezeigt werden. Im Forschungsprojekt wurden zunächst die von den Anwendern gewünschten Anwendungsfälle adressiert. Darüber hinaus sind durch die Flexibilität, die ein mobiler Roboter bietet, weitere Einsatzgebiete möglich. Großes Interesse bestand in der flexiblen Be- und Entladung von Maschinen mit mobilen Robotern, um hier Maschinenbediener zu entlasten und den mobilen Roboter als Springer einzusetzen. Hierbei besteht die Herausforderung, wie der mobile Roboter mit unterschiedlichen Anlagen kommunizieren kann und welche Schnittstellen hier zum Einsatz kommen können.
- Ein weiteres Themenfeld im Umgang mit mobilen Robotern ist die Absicherung des Gesamtsystems für die entsprechenden Tätigkeiten. Hier wurden im Forschungsprojekt bereits tech-

nische Möglichkeiten betrachtet, allerdings müssen diese bis zu einer Zertifizierung noch erweitert und ergänzt werden. Darüber hinaus muss hierfür eine normative Grundlage geschaffen werden.

Durch die zahlreichen abgeleiteten Forschungsfragen wird erkennbar, dass im Projekt FORobotics noch nicht alle Fragen zum Einsatz mobiler, ad-hoc kooperierender Roboter beantwortet werden konnten. Auch die industriellen Einsätze der Robotersysteme bei Mey Maschinenbau und Krones zeigten, dass es noch weiteren Bedarf zur Forschung und Entwicklung, insbesondere hinsichtlich eines flexiblen Einsatz und der ad-hoc Kooperation gibt.



AUTORENVERZEICHNIS

Dr.-Ing. Julia Berger, Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV

Christian Colceriu, Krones AG

Andreas Blank, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Christian Härdtlein, M.Eng., Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV

Dr.-Ing. Tobias Hellig, Institut für Arbeitswissenschaft, RWTH Aachen

Prof. Dr. Dominik Henrich, Lehrstuhl für Angewandte Informatik III, Universität Bayreuth

Lisa Heuss, M.Sc., Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München

Markus Hiller, M.Sc., Lehrstuhl für Informationstechnik mit dem Schwerpunkt Kommunikationselektronik (Stiftungslehrstuhl), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Michaela Krä, M.Eng. & Ing.dipl. (frz.), Lehrstuhl für Produktionsinformatik, Universität Augsburg

Benedikt Leichtmann, Institut für Arbeitswissenschaft, RWTH Aachen

Albrecht Lottermoser, M.Sc, Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV

Shuang Lu, M.Sc., Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV

Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch, Institut für Arbeitswissenschaft, RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV

Michael Riedl, M.Sc., Lehrstuhl für Angewandte Informatik III, Universität Bayreuth

Sebastian Roder, M.Sc., Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München

Katharina Schäfer, M.A., Institut für Arbeitswissenschaft, RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp, Lehrstuhl für Produktionsinformatik, Universität Augsburg

Prof. Dr.-Ing. Jörn Thielecke, Lehrstuhl für Informationstechnik mit dem Schwerpunkt Kommunikationselektronik (Stiftungslehrstuhl), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Ludwig Vogt, M.Sc. Lehrstuhl für Produktionsinformatik, Universität Augsburg

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München

